



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
METROPOLITANA

CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE  
PROCESOS**

ANÁLISIS AMBIENTAL EN EL DISEÑO ÓPTIMO  
DE UN SISTEMA DE COGENERACIÓN PARA  
USO RESIDENCIAL

**AVANCE P-16**

Por. **Ing. Victoria Morales Durán**

Dirigida por: **Dr. José María Ponce Ortega**

Co-Dirigida por: **Dra. Margarita González  
Brambila**

**Diciembre 2016**





## **RESUMEN**

### **ANÁLISIS AMBIENTAL EN EL DISEÑO ÓPTIMO DE UN SISTEMA DE COGENERACIÓN PARA USO RESIDENCIAL.**

Por

Victoria Morales Durán

Diciembre 2016

Dirigido por: Dr. José María Ponce Ortega

Co-Dirigido por: Dra. Margarita González Brambila

Este proyecto presenta una formulación de optimización multiobjetivo para el diseño de sistemas de cogeneración domésticos que busca satisfacer las demandas de calor y energía eléctrica. El modelo incorpora una función objetivo económico que explica la minimización del costo total anual, incluye los costos de capital para las nuevas unidades y el sistema de almacenamiento térmico, así como los costos de operación y mantenimiento. El modelo también considera la interacción con los usuarios externos y la red eléctrica externa. Se lleva a cabo una evaluación del impacto ambiental basada en el análisis del ciclo de vida a través del método del Eco-indicador 99 para tener en cuenta los daños a los recursos, la salud humana y la calidad del ecosistema. La formulación de optimización se resuelve para generar alternativas de diseño y establecer compensaciones entre los diversos objetivos.

**Palabras clave:** Cogeneración, Calefacción Domestica, Impacto Ambiental, Optimización

## **ABSTRACT**

### Involving Environmental Assessment in the Optimal Design of Domestic Cogeneration Systems

By

Victoria Morales Durán

December 2016

Advisor: Dr. José María Ponce Ortega

Co-Advisor: Dra. Margarita González Brambila

This Thesis presents a multi-objective optimization formulation for designing domestic cogeneration systems to satisfy heat and electric energy demands. The model incorporates an economic objective function that accounts for the minimization of the total annual cost, which includes the capital costs for the new units and the thermal storage system as well as the operating and maintenance costs. The model also considers the interaction with the external users and the external electric grid. An environmental impact assessment is carried out based on the life cycle analysis through the Eco-indicator 99 method to account for the damages to the resources, human health and ecosystem quality. The optimization formulation is solved to generate design alternatives and to establish tradeoffs among the various objectives.

**Keywords:** Cogeneration; Domestic heating; Environmental Assessment; Optimization

## **DEDICATORIA**

A mi mamá por siempre animarme, ser mi eterno confidente, por su esfuerzo, paciencia y todo el amor que me ha dado.

A mi papá por ser mi ejemplo de trabajo y esfuerzo, por todo el apoyo que me ha brindado junto con su amor.

A mis hermanos que los adoro aunque nada más me estén molestando.

A mi abuelita Lucy por recibirme en su casa, brindándome su apoyo y amor.

A mi toda mi familia que ha visto por mí, me ha aconsejado, apapachado y cuidado desde siempre.

A mi novio por apoyarme y motivarme a seguir creciendo.

A mis compañeros y amigos del posgrado Male, Ericka, Edgar, Hugo, Toño, José Luis y Ernesto por hacer divertida la estancia de la maestría junto con todo el trabajo que teníamos siempre fuimos muy buen equipo.

A mis amigos morelianos que me acompañaron y cuidaron mientras estaba lejos de casa.

A mis amigos Alicia, Cynthia, Thamara, Elías, Juve, porque seguimos juntos sin importar los diferentes caminos.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>NOMENCLATURA</b> .....	viii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	xiii
<b>CAPÍTULO 1.</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1 Objetivo General</b> .....	2
<b>1.2 Objetivos Particulares</b> .....	3
<b>1.3 Justificación</b> .....	3
<b>1.4 Hipótesis</b> .....	4
<b>CAPITULO 2.</b> .....	5
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	5
<b>2.1 Antecedentes</b> .....	5
<b>2.2 Cogeneración</b> .....	7
<b>2.3 Análisis del Ciclo de Vida</b> .....	15
<b>2.4 Optimización</b> .....	18
<b>CAPITULO 3.</b> .....	21
<b>METODOLOGÍA</b> .....	21
<b>3.1 Planteamiento del problema</b> .....	21
<b>3.2 Formulación matemática</b> .....	22
<b>3.2.1 Metodología GHG</b> .....	22
<b>3.2.2 Metodología LCA</b> .....	23
<b>CAPITULO 4.</b> .....	29
<b>RESULTADOS</b> .....	29
<b>4.1 Caso de estudio.</b> .....	29
<b>4.2 Resultados.</b> .....	31

<b>CAPITULO 5.</b>	37
<b>CONCLUSIONES</b>	37
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	39
<b>APÉNDICE A</b>	44

## LISTA DE TABLAS

**Tabla 1.** Comparación entre tecnologías de sistemas de cogeneración.

**Tabla 2.** Materiales tecnología FC (izquierda) y tecnología SE (derecha) por componente [37, 29]

**Tabla 3.** Puntos Eco-indicador de los materiales utilizados en la producción para el sistema de cogeneración [40]

**Tabla 4.** Cantidad de material y total de puntos eco-indicador por tecnología

**Tabla 5.** Puntos eco-indicador de la energía y los recursos utilizados en el sistema de cogeneración.

**Tabla 6.** Resultados del caso de estudio considerando solo las emisiones.

**Tabla 7.** Resultados del caso de estudio considerando metodología LCA

**Tabla 8.** Resultados solución compromiso



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Consumo mundial de energía por energético, 2012, [3].
- Figura 2.** Consumo total mundial de energía por sector, 2012 [3]
- Fig.3** Comparación entre la producción convencional y sistemas de cogeneración.
- Fig.4** Esquema de un sistema de cogeneración basado en microturbinas.
- Fig.5** Diagrama motor de combustión interna de cuatro tiempos.
- Fig.6** Esquema motor Stirling tipo Alpha.
- Fig. 7** Diagrama Celda de combustible de óxido sólido.
- Fig.8** Concepto de la perspectiva de un LCA.
- Fig.9** Metodología del eco-indicador 99 para el cálculo del LCA.
- Figure 10.** Planteamiento del problema.
- Figura 11.-**Superestructura propuesta para el sistema CHP para un complejo habitacional.
- Fig. 12.** Variación de la temperatura del caso de estudio.
- Fig. 13.** Variación de la demanda eléctrica del caso de estudio.
- Fig. 14.** Variación de la demanda agua caliente del caso de estudio.
- Figura 15.** Soluciones óptimas del caso de estudio.
- Fig. 16.** Tres diferentes impactos de la solución Pareto EI
- Fig.17.** Localización de la solución compromiso en la curva Pareto.

## NOMENCLATURA

### ***Índices***

s Estaciones del año (primavera, verano, otoño, invierno)

t Periodo de tiempo, h

### ***Acrónimos***

BTOE Billones de toneladas equivalentes de petróleo

CHP Combined heat and power

CS Solución compromiso

EI Eco-indicador

EQ Calidad del ecosistema

FC Celda de combustible

GHC Gases de efecto invernadero

HH Salud humana

ICE Motor de combustión interna

LCA Análisis del ciclo de vida

MT Microturbina

RS Recursos Naturales

SE Motor Stirling

ST Tanque térmico

TEI Tipo de impacto ambiental (HH, RS, EQ)

kWe Kilowatt-eléctrico

kWh Kilowatt-hora

kWth Kilowatt-termico

y Año

### **Parámetros**

$CTS^{CHP}$  Cantidad de componentes en kg por kWh utilizados por cada tecnología, kg/kWh

$CTS^{ST}$  Cantidad de componentes en kg por kWh utilizados en el tanque térmico, kg/kWh

$EI_{points}^{CHP-technology^{TEI}}$  Puntos de Eco-indicador generados por el material utilizado en cada tecnología, pts/kg

$EI_{points}^{ST^{TEI}}$  Puntos de Eco-indicador generados por el material utilizado en el tanque térmico, pts/kg

$EI_{points}^{water^{TEI}}$  Puntos de Eco-indicador generados para cada impacto ambiental por el agua utilizad en el proceso, pts/kg

$EI_{points}^{wpurchase^{TEI}}$  Puntos de Eco-indicador generados para cada impacto ambiental por la electricidad comprada a la red, pts/kg

$EI_{points}^{sale^{TEI}}$  Puntos de Eco-indicador generados para cada impacto ambiental por la electricidad producida por el sistema CHP, pts/kg

$EI_{points}^{fuel-TEI}$  Puntos de Eco-indicador generados para cada impacto ambiental por el combustible utilizado en el sistema, pts/kg

$EI_{points}^{heat-TEI}$  Puntos de Eco-indicador generados para cada impacto ambiental por el calor vendido al complejo habitacional, pts/kg

$GHGF^{CHP}$  Toneladas de CO<sub>2</sub>/kWh producidas por cada tecnología, CO<sub>2</sub>/kWh

$GHGF^{GRID}$  Toneladas de CO<sub>2</sub>/kWh producidas por la compañía local de electricidad, CO<sub>2</sub>/kWh

$H_D$  Días de operación, (estación), días

### **Variables**

$CostCap$  Costo de capital anualizado, \$/y

$CostOp$  Costo de operación anualizado, S/y

$CostO \& M$  Costo de operación y mantenimiento anualizado, \$/y

$CostPowerPurch$  Costo de la electricidad comprada a la compañía local de luz anualizada, \$/y

$EIM^{CHP-TEI}$  Impacto ambiental de cada tecnología, pts

$EIM^{ST-TEI}$  Impacto ambiental del tanque térmico, pts

$EI^{water-TEI}$  Impacto ambiental del agua, pts

$EI^{wpurchase-TEI}$  Impacto ambiental de la electricidad comprada, pts

$EI^{wsale-TEI}$  Impacto ambiental de la electricidad producida, pts

$EI^{fuel-TEI}$	Impacto ambiental del combustible utilizado, pts
$EI^{heat-TEI}$	Impacto ambiental del calor producido, pts
$EIT^{HH}$	Total de impacto ambiental a la salud humana, pts
$EIT^{RS}$	Total de impacto ambiental a los recursos naturales, pts
$EIT^{EQ}$	Total de impacto ambiental a la calidad del ecosistema, pts
$F^T$	Total del combustible utilizado por el sistema CHP, \$/y
$GHG^{GRID}$	Emisiones directas de CO <sub>2</sub> producidas por la compañía local de electricidad, kWh
$GHG^{CHP}$	Emisiones directas de CO <sub>2</sub> producidas por el sistema CHP, kWh
$Heatsale$	Calor vendido por el sistema CHP al complejo habitacional, \$/y
$HT^T$	Total del calor producido por el sistema CHP, \$/y
$Powersale$	Electricidad producida por el sistema CHP, \$/y
$SalePower$	Electricidad vendida a la red, \$/y
SEI	Puntos totales del impacto ambiental, pts
$SGHG$	Total de emisiones directas of CO <sub>2</sub> , ton/y
$SW^T$	Total de agua consumida, kg
$TAC$	Costo total anual, \$
$W^{MAX-ST}$	Máxima carga eléctrica almacenada en el ST, kWh
$W^{MAX-CHP}$	Máxima carga eléctrico producida por las tecnologías CHP, kWh

$W^{purchaseT}$	Electricidad total comprada a la compañía local, kWh
$W^{saleT}$	Electricidad total producida por el sistema CHP vendida a la red eléctrica local, kWh

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. José María Ponce Ortega, por la confianza, el apoyo y los conocimientos que me compartió durante esta etapa.

A la Dra. Margarita por su apoyo y contribuciones para este proyecto.

Al CONACyT por el apoyo económico brindado para lograr culminar esta investigación.

A la Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco por abrirme sus puertas.



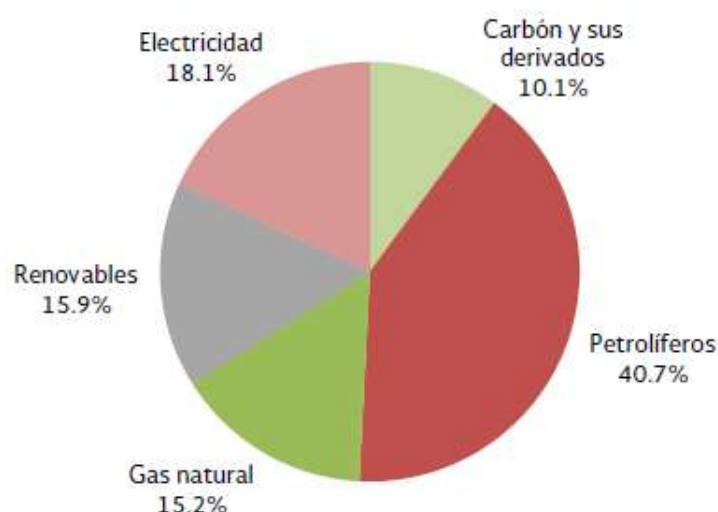


# CAPÍTULO 1.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe clara evidencia de los efectos del cambio climático en el mundo, tales como el aumento significativo de la temperatura, el deshielo de los glaciares, el deterioro de los suelos, el aumento de las precipitaciones, entre otros. En gran parte, estos efectos son consecuencia del alto nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> que se producen por el uso y combustión de energéticos como el carbón, el gas natural, el petróleo y la quema de leña. De acuerdo con información de la Agencia Internacional de Energía (EEA), el sector energético contribuye con aproximadamente 80% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el mundo [1]

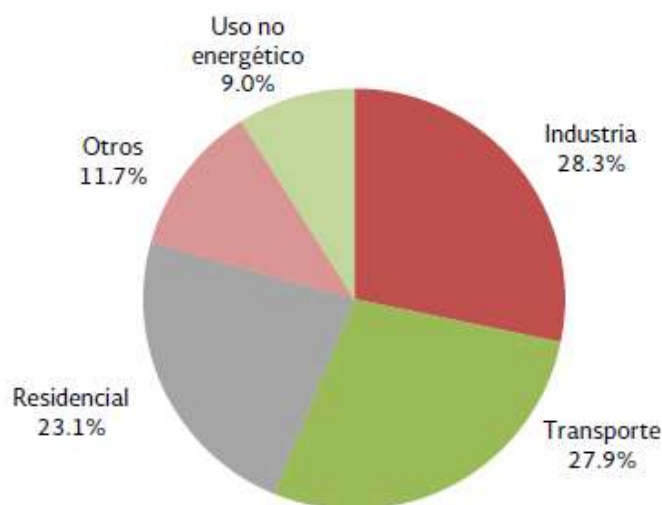
De igual forma, el uso desmedido de energía eléctrica y el uso de equipos de baja eficiencia contribuyen al calentamiento global. El consumo mundial de energía creció 0.7% en 2012, hasta alcanzar 8,978.86 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MMtep) (ver Figura 1). Esto se debió principalmente al incremento en el consumo de electricidad con 2.8%, al incremento de consumo del carbón y sus derivados con 0.6%, así como el incremento de uso de las energías renovables con 0.5%. Los tipos de energía renovable que tuvieron un incremento de consumo fueron la energía solar y la energía eólica, con 20.28 MMtep, cifra 15.7% más alta que la registrada en 2011 [2]



**Figura 1.** Consumo mundial de energía por energético, 2012  
8,978.86 MMtep [3].

En 2012 los países con mayor consumo energético fueron China con 19.0% y Estados Unidos con 16.0% del total. Por su parte, India, Rusia y Japón representaron el 5.7%, 5.1% y 3.4%, respectivamente. Estos cinco países en conjunto consumieron 49.2% de la energía a nivel global y produjeron el 47.0% del PIB mundial durante 2012. Por su parte, México ocupó el décimo sexto lugar en el consumo de energía, lo cual representó 1.3% del total en 2012 [2].

Por sectores de consumo, el principal a nivel mundial fue el industrial con 2,540.76 MMtep, 28.3% del total, seguido por el sector transporte con 2,506.97 MMtep, representando el 27.9% y el residencial con 2,076.06 MMtep constituyendo el 23.1% (Figura 2) [2].



**Figura 2.** Consumo total mundial de energía por sector, 2012  
8,978.86 MMtep [3]

El ahorro de energía es una opción importante para mitigar los problemas ambientales a nivel mundial. En reconocimiento al papel relevante que ocupa el sector vivienda en la estrategia para reducir las emisiones contaminantes, combatir el cambio climático y avanzar hacia un uso sustentable del agua, el gobierno de México y la industria de la vivienda han emprendido esfuerzos importantes hacia un sector residencial más sustentable a través de la promoción de la eficiencia energética y ambiental dentro de las viviendas [4].

## 1.1 Objetivo General

El presente trabajo busca calcular el impacto ambiental de un sistema de cogeneración utilizando la metodología del análisis del ciclo de vida, desarrollando una estrategia de optimización que permita el cálculo del impacto ambiental para sistemas integrados en complejos habitacionales y considerando

el consumo de los usuarios de energía, la tecnología disponible para la implementación del sistema, el costo económico de la instalación, operación y mantenimiento del sistema de cogeneración.

## **1.2 Objetivos Particulares**

- Cuantificar los materiales y energía utilizada en la producción de las tecnologías utilizadas en el sistema de cogeneración, así como la energía utilizada al inicio y durante el proceso.
- Incluir al modelo de optimización la metodología del análisis de ciclo de vida.
- Implementar el modelo a un caso de estudio
- Comparar los resultados obtenidos del caso de estudio cuando se utiliza las emisiones de efecto invernadero vs el análisis de ciclo de vida del sistema de cogeneración.

## **1.3 Justificación**

La cogeneración es un sistema de tecnologías que ayudan a reducir el consumo total de combustible y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la generación simultánea de electricidad y calor útil a partir de la misma cantidad de combustible. El diseño de un sistema de cogeneración tiene que satisfacer las necesidades del proceso industrial y ser económicamente viable. Las posibilidades y limitaciones de este sistema subyacen en la capacidad de interacción de la demanda de energía y la demanda de calor junto con el tamaño y costos de las tecnologías de cogeneración así como los costos de producción y mantenimiento, debido a esto han sido implementadas técnicas de optimización para encontrar el sistema energético óptimo basado en la reducción de costos y maximizar los ingresos. De igual forma, es importante considerar los impactos ambientales significativos que pueden resultar de la satisfacción de las demandas de energía, el diseño debe incorporar criterios ambientales en los criterios de toma de decisiones.

Las demandas de energía con mayor importancia asociada a las viviendas y complejos residenciales son el agua caliente y electricidad, que se satisfacen debido al uso de los recursos naturales ya sean renovables o no renovables generando un impacto en el ambiente. De esta manera, los sistemas de cogeneración se han convertido en el núcleo de los sistemas de recursos energéticos descentralizados (DER) y Micro-grid, que son más eficientes considerando los factores de control, energía, económicos y ambientales [5]. Además, debido a la flexibilidad en el tamaño y el funcionamiento del equipo, los sistemas de cogeneración pueden utilizarse para diferentes escalas, incluidos los usuarios domésticos, comerciales e industriales [6].

## **1.4 Hipótesis**

El modelo de optimización propuesto en este trabajo permitirá obtener beneficios económicos y ambientales al satisfacer las necesidades de electricidad y calor en complejos residenciales.

Para el diseño de dicho sistema se utilizarán algoritmos de optimización. A partir de la superestructura de los modelos se generará una nueva superestructura que contemple las demandas energéticas y de consumo de agua para satisfacer al sistema habitacional tomando en cuenta los costos de implementación, buscando la reducción de consumo de combustible y compra de energía utilizando herramientas de diseño.

## **CAPITULO 2.**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes**

La industria química se ha visto forzada a hacer cambios significativos a sus procesos en los últimos años debido al aumento del costo de energía, regulaciones ambientales y la competencia global. Una de las herramientas de ingeniería más importantes para hacer frente a estos problemas es la optimización de procesos. "Las modificaciones en los procedimientos de diseño y de funcionamiento en las plantas se han implementado para reducir los costos y cumplir con las restricciones, con un énfasis en mejorar la eficiencia y aumentar la rentabilidad" Himmelblau. [7] Una de las herramientas utilizadas actualmente en la industria para generar electricidad y calor, disminuyendo costo de energía y contaminación ambiental es el uso de la cogeneración. El uso práctico de la cogeneración es tan antiguo como la generación de electricidad en sí y su mayor potencial es en el sector industrial [8].

En el área industrial se han realizado muchos trabajos relacionados a la aplicación de sistemas de cogeneración. Al-Azri y col. (2009) desarrollaron un modelo de optimización que proporciona una herramienta de aplicación general para integrar el proceso y el ciclo de potencia, identificando el tamaño óptimo del equipo y los parámetros de funcionamiento (tales como presión de la caldera, temperatura de sobrecalentamiento y carga de vapor), el cual se centra en la interacción del ciclo de potencia con los requisitos de calor del proceso. Bamufleh y col. (2013) implementaron la optimización multi-objetivo en sistemas de cogeneración de proceso con compensaciones económicas, ambientales y sociales, donde la integración de procesos se utiliza como base para la formulación de optimización. Los equipos de cogeneración estudiados en estos casos son de tamaño industrial y aplicados a procesos específicos en la industria dependiendo de sus necesidades. Actualmente, las tecnologías de cogeneración están cada vez más al alcance para aplicaciones de menor escala en instalaciones residenciales y comerciales. Los sistemas de cogeneración apelan a las operaciones comerciales que requieren un suministro continuo de energía confiable, tales como centros de datos, hospitales, universidades y operaciones industriales. La calefacción y refrigeración urbana (DHC) en las ciudades y en las grandes instituciones puede ser cubierta con el uso de la cogeneración y es ampliamente utilizado en Europa en los sectores residencial y comercial [11].

Enfocados en la cogeneración a menor escala y aplicados a sector vivienda Kim y col. (2014) desarrollaron un modelo de evaluación económica y ambiental para

seleccionar la estrategia óptima para la implementación de un sistema de celdas de combustible centrada en la política energética de un edificio residencial, Hong y col. (2014) implementaron un sistema combinado de calor y energía basado en celdas de combustible para un complejo de viviendas multifamiliares ubicado en Seúl, Corea del Sur.

Para tecnologías combinadas, Jiang Jiang y col. (2010) analizaron los rendimientos técnicos, ambientales y económicos de los sistemas CHP tras la gestión de la demanda de energía térmica y eléctrica en diferentes zonas climáticas de China, y Fuentes-Cortes y col. (2015<sup>a</sup>) presentaron diferentes modelos para determinar el tamaño y esquema operativo de los sistemas residenciales de cogeneración. Fuentes-Cortes y col. (2016<sup>a</sup>) minimizaron los costos anuales y las emisiones de gases de efecto invernadero en un sistema de multigeneración, y Fuentes-Cortes y col. (2016<sup>b</sup>) calcularon el riesgo asociado en el sistema de cogeneración residencial.

La mayoría de los trabajos anteriores se han centrado en minimizar los contaminantes generados en el proceso de cogeneración, teniendo en cuenta varios escenarios y variaciones en el proceso. Sin embargo, es importante disminuir el impacto ambiental global y no solo la cantidad de contaminantes, porque hay varios efectos que tiene el proceso de cogeneración sobre la salud humana, la calidad del ecosistema y el agotamiento de los recursos naturales. En este contexto, la evaluación del ciclo de vida (LCA) es una herramienta específica para cuantificar el impacto ambiental global asociado a cualquier proceso o actividad utilizando una perspectiva de sistemas [18].

En la actualidad, LCA representa el principal instrumento en el diseño ambiental de procesos químicos, ya que puede ser utilizado con eficacia para reestructurar cualquier proceso químico para mejorar su desempeño ambiental. Azapagic y Clift (1999) propusieron un modelo para encontrar las mejores estrategias de mejora y elegir la mejor alternativa en el proceso de boro. Guillén-Gosálbez y Grossmann (2009) desarrollaron un enfoque de optimización para minimizar el impacto ambiental y el costo de procesos químicos sostenibles. En el sector vivienda, se han realizado varios estudios de LCA para evaluar los sistemas de cogeneración. Kim y Kim (2014) desarrollaron un modelo de evaluación económica y ambiental para seleccionar la estrategia de implementación óptima del sistema de pilas de combustible. Balcombe y col. (2015) investigaron los impactos asociados en un sistema integrado que involucra tres tecnologías CHP y Safaei y col. (2015) generaron un modelo para estimar el costo y el impacto ambiental para satisfacer las demandas de energía de un edificio.

Cabe señalar que ninguno de los trabajos anteriores ha considerado la síntesis óptima de sistemas de cogeneración domésticos que impliquen simultáneamente objetivos económicos y ambientales a través de la evaluación del ciclo de vida,

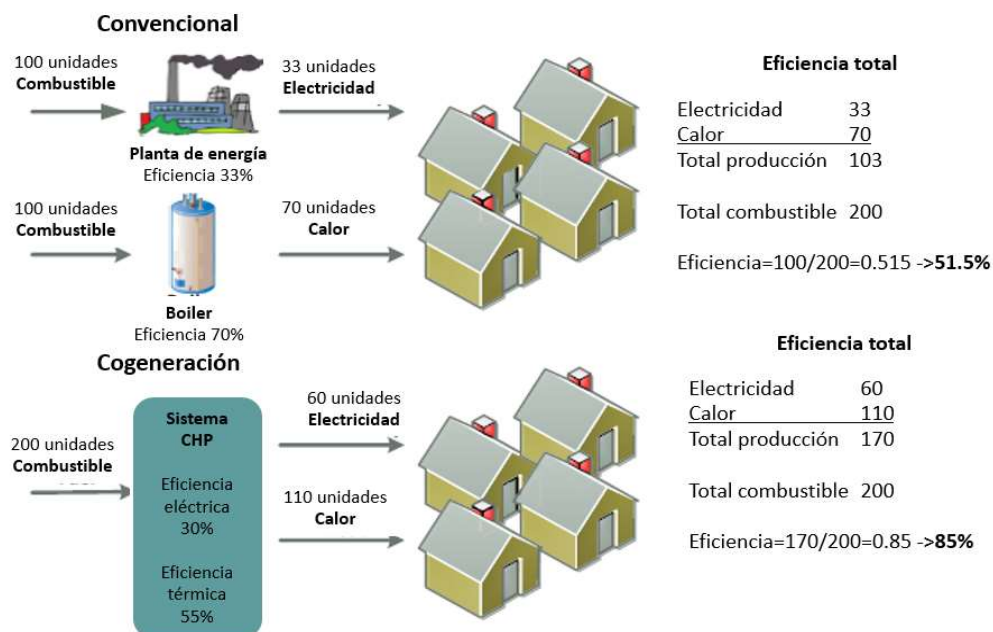
y es importante incluir estos dos objetivos para el diseño y funcionamiento adecuados del sistema de cogeneración. Por lo tanto, este trabajo propone un enfoque de optimización para la determinación de la política de diseño y operación de sistemas de cogeneración doméstico que involucren simultáneamente objetivos económicos y ambientales, donde el objetivo ambiental se determina a través del LCA de todo el proceso. El modelo propuesto incorpora la selección y dimensionamiento óptimo para las tecnologías CHP así como el sistema de almacenamiento de energía también incorpora la interacción con los clientes y portadores externos así como los comportamientos de demanda de los principales usuarios.

## **2.2 Cogeneración** [25]

Debido a su amplia difusión en las últimas tres décadas, la palabra Cogeneración se utiliza con frecuencia en diversos contextos con distintas acepciones. Cogenerar es producir alguna cosa al mismo tiempo que otra, o en conjunto con algo (o alguien) más [24]. Así, la palabra no es estrictamente técnica y puede ser utilizada en diferentes contextos, técnicamente hablando, cuando se hace referencia a un proceso de conversión de energía, Cogeneración o CHP (Combined Heat and Power) se define como:

“La producción de potencia y calor directamente aprovechable, a partir de una fuente común de energía”, Aguilar (2008).

El principio fundamental del CHP, es la recuperación del calor residual producto de la combustión en una planta generadora de electricidad, el cual, de otra forma, hubiera sido liberado en el medio ambiente, desperdiciando con ello una parte importante de la energía todavía disponible. Esta energía, en la mayoría de los casos, puede ser todavía utilizada en diversos usos finales como calefacción de espacios, calentamiento de agua, así como otros procesos térmicos o de refrigeración que se encuentren cercanos a la planta de cogeneración. De esta manera (ver Figura 3), y al evitar las pérdidas de distribución, la cogeneración puede lograr eficiencias superiores al 80 %, en comparación con el 50 % para las tecnologías convencionales (es decir, la electricidad suministrada por la red y una caldera).



**Fig.3** Comparación entre la producción convencional y sistemas de cogeneración.

Los beneficios directos de los sistemas CHP para la industria eléctrica, los clientes de electricidad, y la sociedad, en general son:

- Aumento de la eficiencia energética - proporcionar servicios de energía útil e instalaciones con el menor uso de energía primaria.
- Desarrollo económico - permitiendo a las empresas ser más competitivas económicamente en un mercado mundial manteniendo así el empleo local y la salud económica.
- Reducción de las emisiones que contribuyen al calentamiento global - aumenta la eficiencia del uso de energía que permite alcanzar los mismos niveles de producción o actividad empresarial con niveles más bajos de la combustión de combustibles fósiles y la reducción de las emisiones de dióxido de carbono.
- Reducción de las emisiones de contaminantes atmosféricos - sistemas de cogeneración pueden reducir emisiones a la atmósfera de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), especialmente cuando el equipo de cogeneración reemplaza tecnologías obsoletas y calderas ineficientes.
- Aumento de la fiabilidad y soporte de red para el sistema de servicios públicos y los clientes en su conjunto.

Los sistemas de cogeneración consisten en una serie de componentes individuales; motor de arranque (motor de calor, turbinas, celda de



combustible), generador, recuperación de calor e interconexión eléctrica. El tipo de equipo que impulsa el sistema global (es decir, el motor primario) típicamente identifica el sistema CHP.

**Tabla 1.** Comparación entre tecnologías de sistemas de cogeneración. [25]

	<b>Motor de Diésel</b>	<b>Motor de Gas Natural</b>	<b>Turbina de Vapor</b>	<b>Turbina de Gas</b>	<b>Micro turbina</b>	<b>Celda de combustible</b>
Eficiencia (LHV)	30-50%	25-45%	30-42%	25-40% (simple) 40-60% (combinado)	20-30%	40-70%
Tamaño (MW)	0.05-5	0.05-5	Cualquiera	3-200	0.025-0.25	0.2-2
Área requerida (sqft/kW)	0.22	0.22-0.31	<0.1	0.02-0.61	0.15-1.5	0.6-4
Costo de instalación (\$/kW)	800-1500	800-1500	800-1000	700-900	500-1300	>3000
Costos de O&M (\$/kW)	0.005-0.008	0.007-0.015	0.004	0.002-0.008	0.002-0.01	0.003-0.015
Disponibilidad	90-95%	92-97%	Cerca de 100%	90-98%	90-98%	>95%
Horas de trabajo continuo	25,000-30,000	24,000-60,000	>50,000	30,000-50,000	5,000-40,000	10,000-40,000
Tiempo de arranque	10 s	10 s	1 h -1 día	10 min -1 h	60 s	3 h -2 días
Presión del combustible (psi)	<5	1-45	n/a	120-500 (Puede requerir compresor)	40-100 (Puede requerir compresor)	0.5-45
Combustible	diésel y combustóleo	Gas natural, biogás, propano.	Todo	Gas natural, biogás, propano, hidrocarburos varios.	Gas natural, biogás, propano, hidrocarburos varios.	Hidrógeno, gas natural, propano.
NOx (lb/MWh)	3-33	2.2-28	1.8	0.3-4	0.4-2.2	<0.02
Usos del calor recuperado	Agua caliente, vapor de baja presión, calefacción urbana.	Agua caliente, vapor de baja presión, calefacción urbana.	Vapor de Baja y Alta presión, calefacción urbana.	Calentamiento directo, agua caliente, Vapor de Baja y Alta presión, calefacción urbana.	Calentamiento directo, agua caliente, Vapor de Baja presión.	Agua caliente, Vapor de Baja y Alta presión.
Salida del CHP (BTU/kWh)	3,400	1,000-5,000	n/a	3,400-12,000	4,000-15,000	500-3,700
Temperatura utilizable para la CHP (°F)	180-900	300-500	n/a	500-1,100	400-650	140-700

Todas las tecnologías descritas en la Tabla 1 convierten un combustible químico en energía eléctrica. La energía en el combustible que no se convierte directamente en electricidad sino que se libera como calor. Todas las tecnologías, a excepción de las pilas de combustible, son una clase de tecnologías conocidas como motores térmicos. Los motores térmicos queman el combustible para producir calor, y una parte de ese calor se utiliza para producir electricidad mientras que el calor restante se agota del proceso. Las pilas de combustible convierten la energía en el combustible a la electricidad electroquímicamente.

Seleccionar la tecnología a utilizar depende de diversos factores como costos, demandas, combustible, espacio y regulaciones ambientales. En este trabajo, las tecnologías que puede seleccionar nuestro modelo de optimización son microturbina [MT], motor de combustión interna [ICE], motor stirling [SE] y celdas de combustible [FC]. Se han elegido estas tecnologías en función a su aplicación en el área residencial ya que se encuentran disponibles a menor escala. El funcionamiento de cada una se describe a continuación.

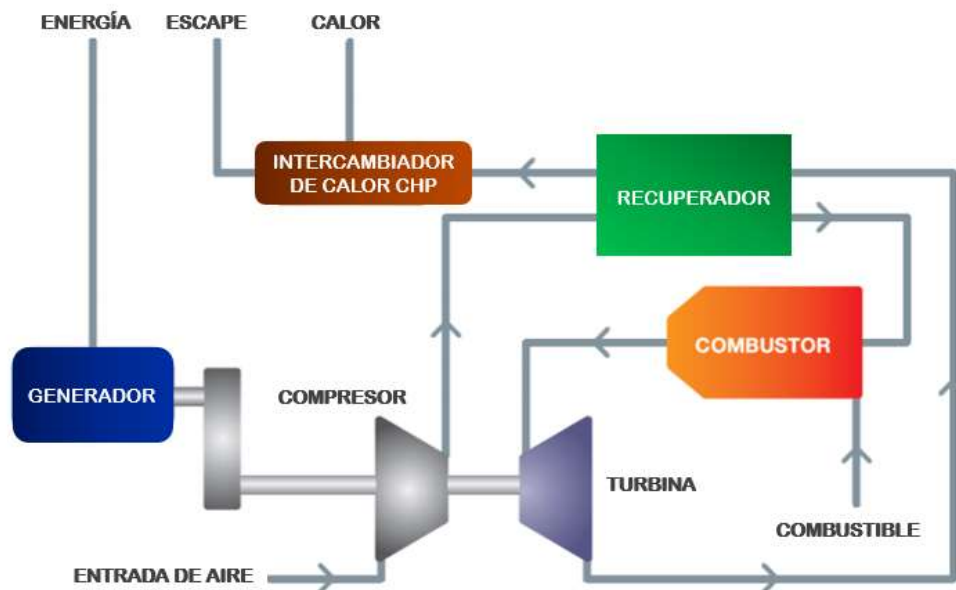
#### *Microturbina* [25, 26]

Las microturbinas son pequeñas turbinas de combustión que queman combustibles gaseosos o líquidos para conducir un generador eléctrico, tienen cuatro modos distintos de operación: aislado de la red eléctrica, conectado a la red, en paralelo con exportación de energía, y de modo continuo o intermitente a la misma. Sus principales características son: rango de 15 kW a 300 kW en una sola unidad; frecuencia de 1,600 Hz; mantenimiento mínimo; sus unidades ocupan muy poco espacio; son ligeras; operan sin vibración, prácticamente no hacen ruido; operan de 40,000 a 75,000 horas y pueden utilizar como combustible, además del gas natural, el keroseno, gasolina, etanol, diésel, propano y biomasa. Una de sus principales características es la reducción de emisiones contaminantes: 9 partes por millón (ppm) de NO<sub>x</sub>, 40 ppm de CO y emisiones totales de hidrocarburos por debajo de las 9 ppm.

Las microturbinas son ideales para aplicaciones de generación distribuida debido a su flexibilidad en los métodos de conexión, su capacidad para ser apiladas en paralelo para servir cargas mayores, su capacidad para proporcionar una potencia estable y confiable y sus bajas emisiones.

Las microturbinas funcionan igual que un ciclo termodinámico (ciclo de Brayton), en este ciclo, el aire atmosférico es comprimido, calentado y los gases calientes impulsan una turbina de expansión que impulsa tanto el compresor de entrada y a la turbina que es capaz de proporcionar energía mecánica o eléctrica (ver Figura 4). Aparte de la diferencia de tamaño, las microturbinas se diferencian de las turbinas de gas más grandes porque normalmente tienen relaciones de compresión más bajas y operan a temperaturas de combustión más bajas. Con

el fin de aumentar la eficiencia, las microturbinas recuperan una parte del calor de escape en un intercambiador de calor denominado recuperador, para aumentar la energía de los gases que entran en la turbina de expansión, aumentando así la eficiencia.



**Fig.4** Esquema de un sistema de cogeneración basado en microturbinas [26].

Las microturbinas funcionan a altas velocidades de rotación de hasta 60.000 revoluciones por minuto. De los dos principales actores de la industria nacional, Capstone acopla esta salida de eje directamente a un generador de alta velocidad y utiliza electrónica de potencia para producir electricidad de 60 Hz. FlexEnergy utiliza una caja de cambios para reducir la velocidad de accionamiento a 3600 rpm para alimentar un generador eléctrico síncrono.

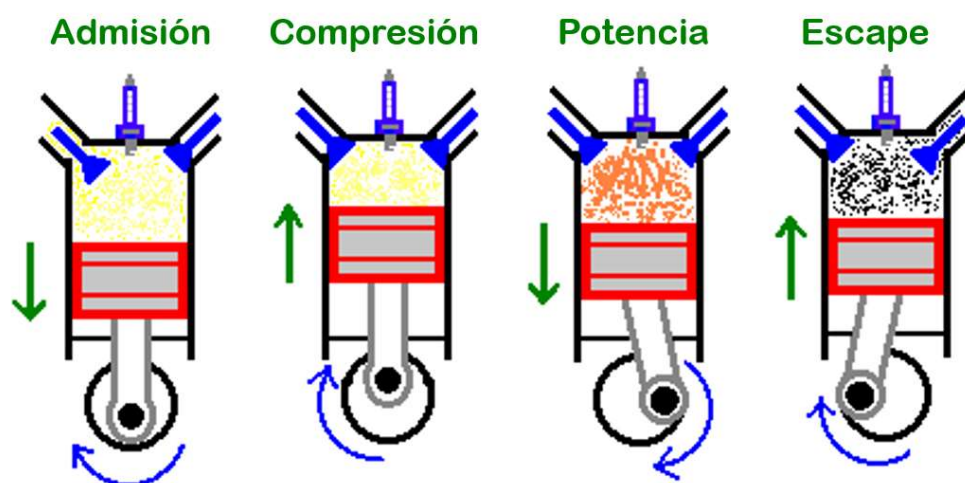
#### *Motor de combustión interna* [27]

Los motores de combustión interna son la tecnología más extendida para la generación de energía, se encuentran en pequeños generadores portátiles, así como grandes motores industriales, utilizan diésel, gasóleo o gas natural; existen en capacidades de 15 kW a mayores de 20,000 kW, alcanzan eficiencias eléctricas del orden del 40% y eficiencias térmicas cercanas al 33%; la temperatura de gases de escape producto de la combustión es de 400°C.

Los motores de combustión interna comienzan rápidamente, siguen bien las cargas, tienen buenas eficiencias, tienen un bajo costo de inversión, una vida útil de 25 años, alta eficiencia a baja carga, consumo medio de agua, poco

espacio para instalación, flexibilidad de combustibles y su crecimiento puede ser modular. Sus desventajas son sus altos costos de mantenimiento, limitaciones de aplicaciones de cogeneración a temperaturas más bajas, emisiones atmosféricas relativamente altas, alto nivel de ruido de frecuencia, y que deben ser enfriados incluso si no se usa calor recuperado.

El ICE requiere combustible, aire, compresión y una fuente de combustión para funcionar. El motor de combustión interna de gas natural (ver Figura 5) de cuatro tiempos y encendido por chispa tiene un ciclo de admisión, compresión, potencia y escape. En la fase de admisión, cuando el pistón empieza en la posición de punto muerto inferior en el cilindro y la válvula de admisión se abre, el cilindro se llena de combustible y aire que mueve el pistón al punto muerto superior. El pistón es entonces devuelto al fondo del cilindro durante el proceso de compresión, momento en el que la bujía emite una chispa para encender la mezcla de combustible / aire. Esta reacción controlada, o "quemadura", obliga al pistón hacia arriba girando de este modo el cigüeñal y produciendo potencia. En la fase de escape, el pistón retrocede hasta su posición original y la mezcla gastada es expulsada a través de la válvula de escape abierta. La energía en el combustible se libera durante la combustión y se convierte en trabajo del eje y calor. El trabajo del eje impulsa al generador mientras el calor es liberado del motor a través del refrigerante, los gases de escape y la radiación superficial.



**Fig.5** Diagrama motor de combustión interna de cuatro tiempos [27].

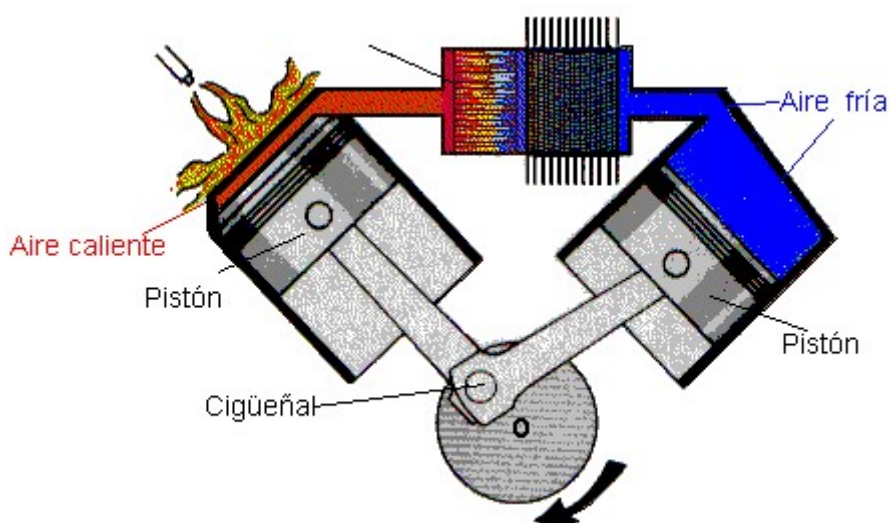
Aproximadamente el 60-70% de la entrada de energía total se convierte en calor, algunos de los cuales pueden recuperarse por el escape del motor y por la chaqueta térmica, mientras que cantidades más pequeñas también están disponibles en el refrigerador de aceite lubricante y en el radiador del turbocompresor. El vapor o el agua caliente se pueden generar del calor recuperado que se utiliza típicamente para el calentamiento del espacio, el recalentamiento, el agua caliente doméstica y el enfriamiento de la absorción.

### *Motor Stirling* <sup>[27]</sup>

Los motores Stirling generan energía motriz o eléctrica utilizando un ciclo accionado por una fuente de calor externa. Esto los diferencia de los motores de combustión interna, que queman combustible dentro del fluido de trabajo.

El motor Stirling (ver Figura 6) es un motor de calor regenerativo de ciclo cerrado con un fluido gaseoso de trabajo permanentemente. Ciclo cerrado, en este contexto, significa un sistema termodinámico en el que el fluido de trabajo está permanentemente contenido dentro del sistema y regenerativo describe el uso de un tipo específico de intercambiador de calor interno y almacén térmico conocido como regenerador. El motor de Stirling tiene una alta eficiencia comparada a los motores de vapor debido a su funcionamiento reservado y su capacidad de utilizar casi cualquier fuente de calor.

El motor está diseñado de tal manera que el gas de trabajo se comprime generalmente en la parte más fría del motor y se expande en la parte más caliente resultando en una conversión neta de calor en trabajo. Esto se logra moviendo el gas hacia adelante y hacia atrás entre los intercambiadores de calor caliente y frío, a menudo con un regenerador entre el calentador y el enfriador, el intercambiador de calor caliente está en contacto térmico con una fuente de calor externa, tal como un quemador de combustible, y el intercambiador de calor frío está en contacto térmico con un disipador de calor externo, tal como aletas de aire.



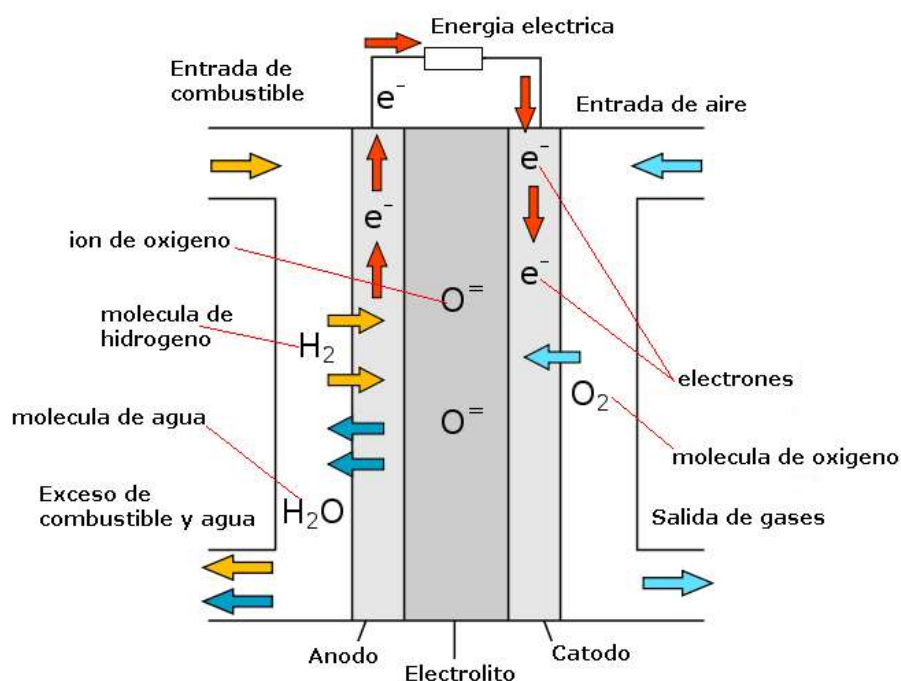
**Fig.6** Esquema motor Stirling tipo Alpha <sup>[27]</sup>

El motor Stirling ha alcanzado eficiencias del 50%, similar a la cifra máxima para motores de ciclo diésel. La eficiencia del motor está relacionada con la temperatura ambiental, la mayor eficiencia se obtiene cuando el clima es más fresco.

### Celda de Combustible [24,25]

Los sistemas de celdas de combustible emplean un enfoque totalmente diferente a la producción de electricidad que las tecnologías de motores primarios basados en la combustión tradicional. Las pilas de combustible son similares a las baterías en que ambos producen una corriente directa a través de un proceso electroquímico sin la combustión directa de una fuente de combustible. Sin embargo, mientras que una batería proporciona energía de una cantidad finita de energía almacenada, las pilas de combustible pueden funcionar indefinidamente, siempre que la disponibilidad de una fuente de combustible continúa. Dos electrodos (un cátodo y un ánodo) pasan iones cargados en un electrolito para generar electricidad y calor. Un catalizador mejora el proceso.

Las celdas de combustible ofrecen el potencial para una generación de energía limpia, silenciosa y eficiente. Debido a que el combustible no se quema, sino que reacciona electroquímicamente, hay una contaminación del aire mínima asociada con su uso.



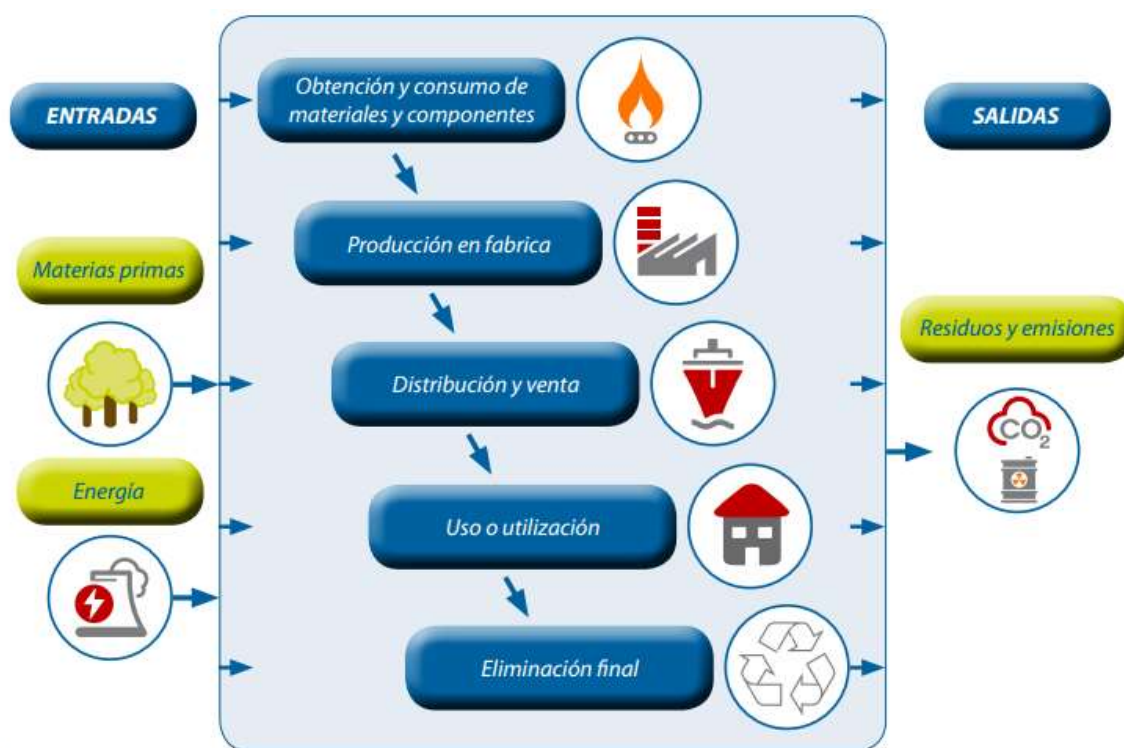
**Fig. 7** Diagrama Celda de combustible de óxido sólido [25].

Hay cuatro tipos primarios de pilas de combustible que se utilizan para aplicaciones estacionarias combinadas de calor y energía (CHP). Estos incluyen: 1) ácido fosfórico (PAFC), 2) carbonato fundido (MCFC), 3) óxido sólido (SOFC), y 4) membrana de intercambio de protones (PEMFC). La SOFC (Fig. 7), utiliza electrolitos sólidos y no porosos de óxido metálico tiene alta eficiencia, estabilidad y fiabilidad, y altas temperaturas internas.

El sistema SOFC tubular de cogeneración alimentado con gas natural tiene una potencia eléctrica de 125 kW y el calor de escape puede recuperarse para las cargas de agua caliente y calefacción.

## 2.3 Análisis del Ciclo de Vida [28, 29, 30]

La creciente conciencia respecto a la importancia de la protección de nuestro entorno, y los posibles impactos ambientales asociados con los productos que consumimos, aumentaron el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y abordar esos impactos. Una de las técnicas desarrolladas en este sentido es el LCA por sus siglas en ingles que significa el análisis del ciclo de vida.



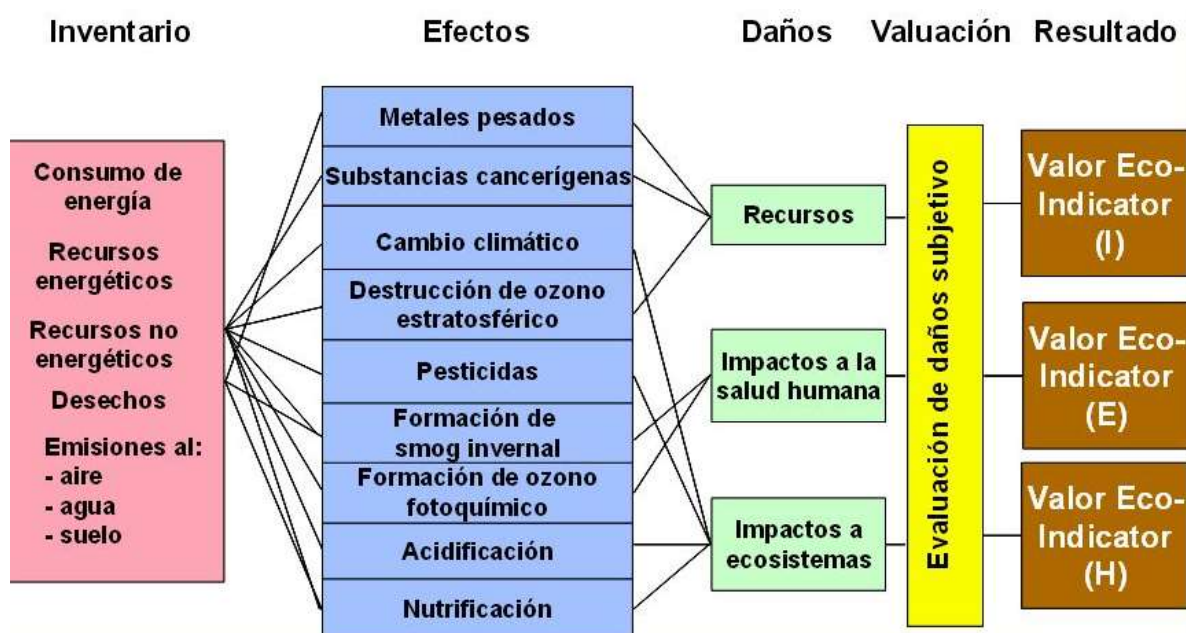
**Fig.8** Concepto de la perspectiva de un LCA [29].

El LCA (ver Figura 8), es una herramienta metodológica que sirve para medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida (desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida). Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener unos resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos. La herramienta permite realizar un análisis mediante la cuantificación del uso de



recursos, (EI) eco indicador ("entradas" como energía, materias primas, agua) y emisiones ambientales ("salidas" al aire, agua y suelo) asociados con el sistema que se está evaluando de acuerdo a las fases que lo componen como ser la extracción y obtención de las materias primas necesarias para fabricarlo, producción en fabrica, uso y/o consumo, transporte y distribución y, por último, disposición final del propio producto. A este tipo de ciclo de vida se le denomina comúnmente "de la cuna a la tumba". Y cuando solo se tienen en cuenta las entradas/salidas del sistema productivo (procesos de fabricación), se le llama "de la puerta a la puerta".

El método LCA se ha ampliado para incluir un método de ponderación. Esto ha permitido calcular una sola puntuación para el impacto ambiental total basado en los efectos calculados. El Eco-indicador (ver Figura 9) de un material o proceso es, por lo tanto, un número que indica el impacto ambiental de un material o proceso, basado en los datos de una evaluación del ciclo de vida. Cuanto mayor sea el indicador, mayor será el impacto ambiental.



**Fig.9** Metodología del eco-indicador 99 para el cálculo del LCA [30].

En la metodología del Eco-indicador 99 se ha definido el término "medio ambiente" con tres tipos de daños:

- Salud humana: Dentro de esta categoría se incluyen el número y la duración de las enfermedades y los años de vida perdidos debido a la muerte prematura por causas ambientales. Los efectos que incluimos son:



cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, efectos cancerígenos, efectos respiratorios y radiación ionizante (nuclear).

- Calidad del ecosistema: Dentro de esta categoría se incluye el efecto sobre la diversidad de especies, especialmente para plantas vasculares y organismos inferiores. Los efectos que incluimos son: ecotoxicidad, acidificación, eutrofización y uso de la tierra.
- Recursos: Dentro de esta categoría se incluye el excedente de energía necesaria en el futuro para extraer minerales de menor calidad y recursos fósiles. El agotamiento de los recursos agrícolas y a granel como arena y grava se considera bajo el uso de la tierra.

Los valores del eco-indicador 99 están disponibles para los materiales. Los indicadores de los procesos de producción se basan en un kilo de material, los procesos de producción, tratamiento y procesamiento de diversos materiales. Los procesos de transporte se expresan principalmente en la unidad de tonelada-kilómetro, los procesos de generación energética las unidades se dan para la electricidad y el calor y los escenarios de eliminación, estos son por kilo de material, subdivididos en tipos de materiales y métodos de procesamiento de residuos.

Para calcular la puntuación del Eco-indicador, se necesitan tres pasos:

1. Inventario de todas las emisiones relevantes, extracciones de recursos y uso del suelo en todos los procesos que forman el ciclo de vida de un producto. Este es un procedimiento estándar en Life Cycle Assessment (LCA)
2. Cálculo de los daños que estos flujos causan a la Salud Humana, Calidad de los Ecosistemas y Recursos
3. Ponderación de estas tres categorías de daños.

La validez de los resultados de los estudios de LCA dependen mucho de la calidad de los datos requeridos y los límites o alcances que se establecen al calcular el LCA. Dependiendo del tipo de impacto al medio ambiente son las unidades que tiene el eco-indicador. Los Daños a la Salud Humana se expresan como DALY (Años de Vida Ajustados por Incapacidad) basados en modelos para los efectos respiratorios y carcinógenos, los efectos del cambio climático, el agotamiento de la capa de ozono y la radiación ionizante. Los daños a la calidad del ecosistema se expresan como el porcentaje de especies que han desaparecido en una determinada zona debido a la carga ambiental y la extracción de recursos se relaciona con un parámetro que indica la calidad de los recursos minerales y fósiles restantes. En ambos casos la extracción de estos recursos resultará en mayores requerimientos de energía para la extracción futura.

## 2.4 Optimización [31,32]

Los modelos de optimización matemática consisten en generar modelos matemáticos con objetivos específicos como, reducir costos económicos y emisiones contaminantes, o maximizar la producción energética o los ingresos por venta de energía sujeta a restricciones [29].

Existen dos enfoques respecto a las funciones objetivo, las técnicas mono-objetivo y las multi-objetivo. Las técnicas mono-objetivo basan la optimización en encontrar una o más soluciones factibles que corresponden a valores extremos de una sola función objetivo. Estas soluciones se denominan "soluciones óptimas" y están determinadas por sub-funciones llamadas restricciones, las cuales delimitan el alcance de la solución óptima. La optimización multi-objetivo engloba la solución de problemas de optimización con dos o más funciones objetivo. De manera general un problema de optimización multi-objetivo se formula matemáticamente de la siguiente manera:

$$\min \{f_1(x, y), f_2(x, y), \dots, f_{nf}(x, y)\}$$

$$\text{Sujeto a: } h(x, y) = 0$$

$$g(x, y) \leq 0$$

$$x \in \mathbb{R}^n, y \in \mathbb{R}^m, h \in \mathbb{R}^p, g \in \mathbb{R}^r$$

El problema tiene  $nf$  objetivos,  $n$  variables continuas ( $x$ ) y  $m$  variables discretas ( $y$ ) así como vectores con restricciones de igualdad y desigualdad ( $h(x, y)$  y  $g(x, y)$ , respectivamente).

Los métodos para resolver este tipo de problemas generalmente se clasifican de acuerdo al número de soluciones generadas y el papel que los tomadores de decisiones tienen a la hora participar en la solución del problema. Se clasifican en dos grupos: *generating methods* y *preference-based methods*. Los primeros generan una o varias soluciones Pareto sin tomar en cuenta la opinión de los tomadores de decisiones, ya que los tomadores de decisiones intervienen una vez que se generan las soluciones. Por otro lado, los métodos basados en preferencias tienen a la hora participar en los tomadores de decisiones para encontrar la solución al problema.

Los métodos utilizados para resolver el modelo de optimización en el presente trabajo son:

*Método  $\varepsilon$ -constraint*

Este método fue propuesto por Chankong y Haimes en 1983. Es un *preference-based methods*, donde los tomadores de decisiones seleccionan un objetivo para minimizarlo y el resto de los objetivos se restringen a valores objetivo dados. En términos matemáticos, si se selecciona a  $f_j(x)$  como la función objetivo que se busca minimizar, se tendría el siguiente problema:

$$\begin{aligned} \min f_j(x) \\ f_i(x) \leq \varepsilon_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \setminus \{j\} \\ x \in S \end{aligned}$$

donde  $x$  es el vector de las variables de decisión,  $f_j(x)$  son las  $j$  funciones objetivo y  $S$  es la región factible. En el método  $\varepsilon$ -constraint optimizamos una de las funciones objetivo utilizando las otras funciones objetivo como restricciones, incorporándolas en la parte de restricción del modelo.

Las ventajas del método  $\varepsilon$ -constraint altera la región factible original y es capaz de producir soluciones eficientes no extremas, como consecuencia es posible explotar casi cada ejecución para producir una solución eficiente diferente, obteniendo así una representación más rica del conjunto eficiente. Además se puede controlar el número de soluciones eficientes generadas ajustando adecuadamente el número de puntos de rejilla en cada uno de los rangos de funciones objetivo.

*Método valor utópico.*

El método del valor utópico, como su nombre indica, un punto ideal dado por la intersección de los valores objetivos obtenidos cuando cada objetivo se minimiza de forma independiente sin tener en cuenta el resto de los objetivos en conflicto. El enfoque determina automáticamente el punto a lo largo del frente de Pareto de la distancia mínima hasta el llamado punto de la utopía.

Dado que el enfoque no requiere la construcción del frente de Pareto, es adecuado para la implementación en tiempo real.

En el caso de dos objetivos, se asume un dominio para el primer objetivo  $[\Phi_1^j, \Phi_2^U]$  y se discretiza usando  $j = 1, \dots, T$  puntos denotados por  $\Phi_1^j$ . Con el fin de determinar las coordenadas correspondientes del frente de Pareto para el segundo objetivo,  $\Phi_2^j$  el problema de optimización se plantea como:

$$\begin{aligned} & \min_x \Phi_2(x, \omega) \\ & \text{Sujeto a} \\ & g(x, \omega) \leq 0 \\ & \Phi_2(x, \omega) \geq \Phi_1^j \end{aligned}$$

Para  $j = 1, \dots, T$ . Dado que los objetivos son conflictivos  $\Phi_1^j$ , actúa como una restricción de bloqueo. El punto utópico es obtenido de la solución  $(x_i^L)$  con coordenadas  $\Phi_i^L = \Phi_i(x_i^L)$  en el espacio costo. Las coordenadas están dadas por la solución del problema.

$$\min_x \Phi_i(x) \text{ s.a } g(x, \omega) \leq 0 \text{ donde } i \in M$$

El punto de la utopía es inalcanzable porque no es posible minimizar un objetivo sin aumentar los otros. En consecuencia, este punto se encuentra por debajo del frente de Pareto. Para acercarse al rendimiento límite, el experto puede elegir el peso correspondiente al punto a lo largo del frente de Pareto que está más cerca del punto de la utopía. Este punto se conoce como solución de compromiso  $(x^c)$  con coordenadas  $\Phi_i(x^c), i \in M$ .

## CAPITULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Planteamiento del problema

El problema abordado determina el sistema óptimo de cogeneración para satisfacer las demandas de calor y electricidad en un complejo residencial que incorpore simultáneamente objetivos económicos y ambientales (ver Figura 3). El modelo propuesto determina la configuración óptima del sistema CHP mediante la selección del conjunto de tecnologías, así como la política operativa. Para resolver este problema, se propone la superestructura mostrada en la Fig. 10, que incorpora la selección óptima de Motor de Combustión Interna (ICE), Micro Turbina (MT), Pila de Combustible (FC) y Motor Stirling (SE), y el adecuado sistema de almacenamiento de energía para integrar el sistema global para satisfacer las demandas de energía doméstica.

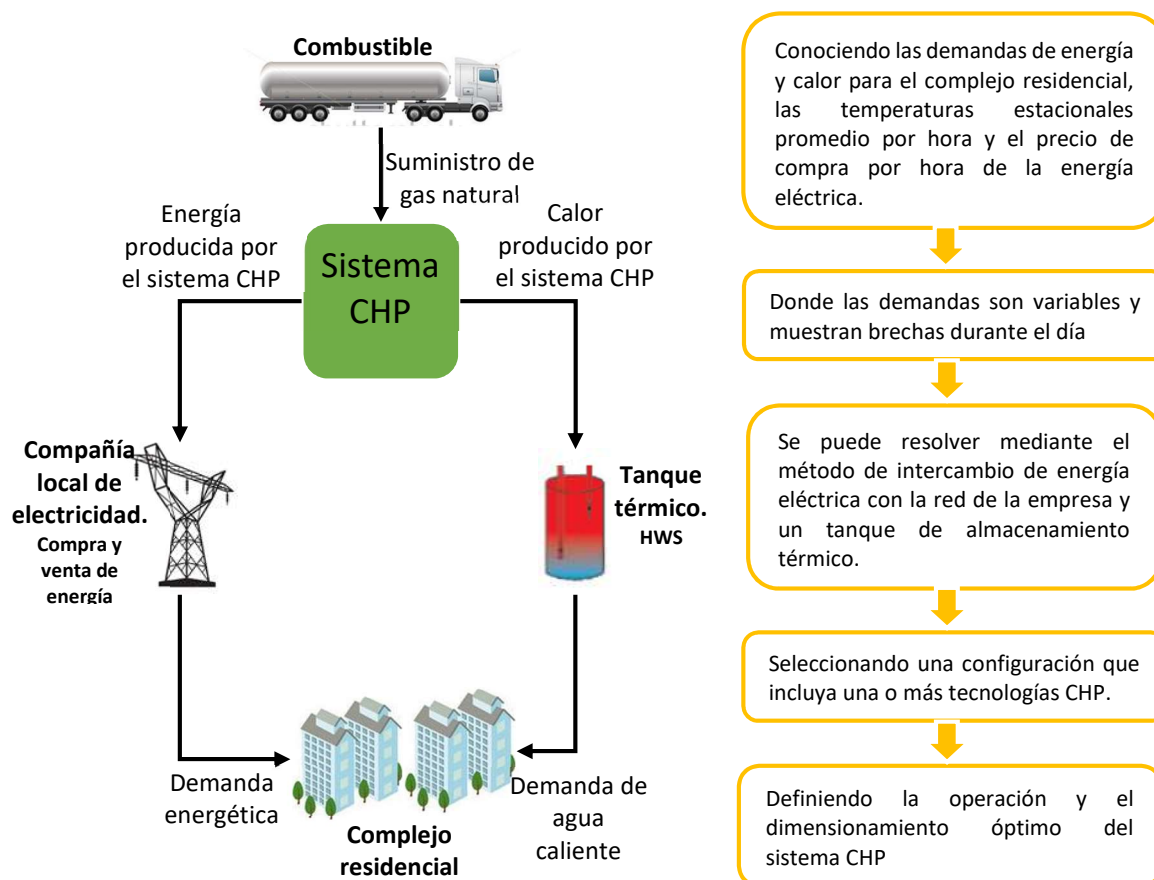
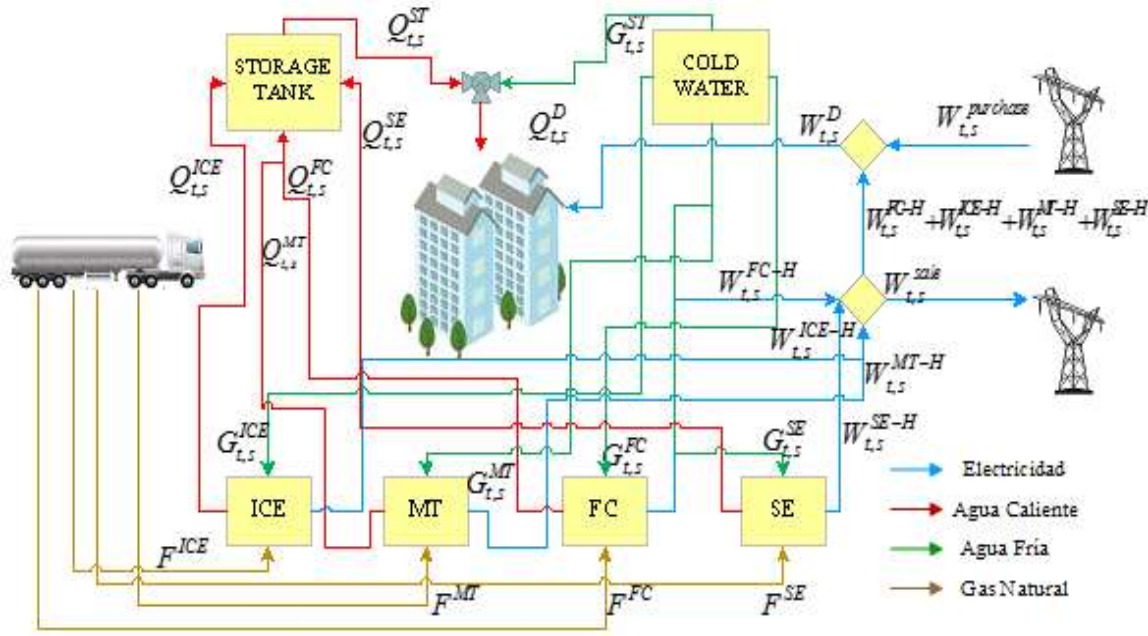


Figure 10. Planteamiento del problema.

### 3.2 Formulación matemática

Tomando como referencia la superestructura implementada en el diseño óptimo de los sistemas integrados de cogeneración para complejos de vivienda (Fuentes-Cortés et al., 2015) (ver Figura 11). Se utiliza la metodología del LCA para calcular el impacto ambiental para el modelo de cogeneración y las emisiones de efecto invernadero.



**Figura 11.**-Superestructura propuesta para el sistema CHP para un complejo habitacional

#### 3.2.1 Metodología GHG

Las emisiones de efecto invernadero en el sistema CHP son calculadas en base al consumo de los combustibles fósiles y la energía comprada a la empresa local de electricidad, las emisiones del combustible dependen de la calidad del combustible utilizado y las emisiones eléctricas dependen del proceso utilizado para la generación de electricidad en la compañía eléctrica local. En ambos casos se considera un factor de generación por unidad de consumo ( $GHGF^{CHP}$ ,  $GHGF^{GRID}$ ):

$$GHG^{CHP} = GHGF^{CHP} \sum_s H_D \sum_t F_{t_s}^{CHP} \quad (1)$$

$$GHG^{GRID} = GHGF^{GRID} \sum_s H_D \sum_t W_{t_s}^{purchase} \quad (2)$$

### 3.2.2 Metodología LCA

El impacto ambiental del sistema CHP es calculada a partir de los materiales y la energía utilizada en la producción de las tecnologías de cogeneración, los materiales y energía utilizada en la proceso de operación y la energía producida por el sistema CHP. Los materiales, la energía y el transporte para la obtención de los materiales para la fabricación, el reciclaje y el final de la vida del sistema no fue tomada en cuenta debido a la falta de información requerida.

#### *Material para la fabricación*

El material ocupado en la fabricación de las tecnologías de cogeneración, se obtuvieron de la literatura [26, 33, 34]. Las micro-turbinas [MT] varían en tamaños de entre 30kW-350kW y el sistema utiliza gas natural como combustible. El material requerido para la construcción del proceso de unidad de cogeneración MT es  $1.26333E + 04$  kg/MW de acero basado en el peso de una unidad de MT (758 kg) dada en la literatura [35], el sistema de cogeneración ICE modelado tiene un tamaño de 150 kW y requiere de combustible, aire, compresión y una fuente de combustión para funcionar, el material de construcción utilizado en el proceso de fabricación es acero:  $2.72722E + 04$  kg/MW y el tanque de almacenamiento térmico usado utiliza  $1.75E + 02$  kg/kWh de acero. [36]

**Tabla 2.** Materiales tecnología FC (izquierda) y tecnología SE (derecha) por componente [38, 29]

Materiales		Valor [kg/kWh]	Materiales		Valor [kg/kWh]
<i>FC fabricación</i>			<i>SE fabricación</i>		
LaMnO <sub>3</sub>	La	2.44507181	Agua		94
	Mn	0.96704141	Hierro		33
	O <sub>3</sub>	0.84488253	Acero		30
Agua		0.983	Acero cromado		6.8
LaCrO <sub>3</sub>	La	0.03604916	Cobre		0.99
	Cr	0.01349418	Aluminio		0.53
	O <sub>3</sub>	0.01245667	Estaño		0.057
Ni oxido		0.078	Plomo		0.026
Ni		4.17E-05	Níquel		0.013
ZrCl <sub>4</sub>	Zr	0.32412805	Zinc		0.0088
	Cl	0.50387195	Polietileno de alta densidad		2.8
YCl <sub>3</sub>		0.122	Cloruro de polivinilo		0.26
ZrO <sub>2</sub> (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		0.078	Cerámica		0.11
Butiral de polivinilo		0.031	Lana de roca		2.6
Etanol		0.187			
Polientilen glicol		0.012			
Dibutil ftalato		0.012			

La FC y el SE utilizan más materiales para su construcción, las FC varían en tamaño entre 200 kW-250 kW y se basa en el diseño Siemens Westinghouse [37]. La Tabla 2 describe los principales materiales utilizados para su fabricación [38], la SE considerada es Baxi Ecogen, que se fabrica en el Reino Unido con una capacidad de 1 kWe y 6.4 kWth, los materiales requeridos se dan en la Tabla 1 y se han obtenido principalmente del fabricante [38, 29].

Todos los materiales se basan en la cantidad de energía producida en cada una de las tecnologías y la energía almacenada en el depósito térmico porque a partir de la energía el modelo de optimización calcula el tamaño del equipo y estas son variables de diseño en el sistema de cogeneración.

Los puntos de eco-indicador se calculan utilizando la base de datos de ecoinvent 3.2. Ecoinvent ayuda a las empresas a fabricar productos en armonía con el medio ambiente, los gobiernos apliquen nuevas políticas, y los consumidores adopten un comportamiento ambientalmente amigable [39]. La base de datos ecoinvent con su estructura modular y el suministro de proceso de la unidad multi-producto de datos en bruto son adecuados para soportar ambos tipos de modelado del sistema [40]. Los puntos Ecoindicador de los materiales empleados para las tecnologías y el tanque térmico se obtuvieron de la base de datos de ecoinvent 3.2 y se encuentran descritos en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Puntos Eco-indicador de los materiales utilizados en la producción para el sistema de cogeneración [41]

Puntos				Puntos			
Material	Calidad del ecosistema	Salud humana	Recursos	Material	Calidad del ecosistema	Salud humana	Recursos
Aluminio	0.097122	0.97242	0.25777	Ni oxide	0.24888	0.53508	1.1735
Acero cromado	0.39684	0.48945	0.44379	Poli etilenglicol	0.0085572	0.06555	0.15752
Cobre	2.7342	12.541	1.0169	Cloruro de polivinilo	0.0058225	0.037077	0.1471
Etanol	0.0031757	0.026564	0.1371	Lana de roca	0.0080975	0.061647	0.030244
Polietileno alta densidad	0.0019742	0.030172	0.22403	Acero	0.022672	0.15046	0.048645
Hierro	0.040611	0.16966	0.055399	Estaño	0.26568	2.8105	21.414
LaCrO <sub>3</sub>	0.5643673	2.135604	1.6577279	Aguar	0.0005735	0.0019942	0.0018854
LaMnO <sub>3</sub>	0.1766668	1.0551904	1.0191887	Zinc	0.024145	0.12102	0.18717
Plomo	0.017273	0.08593	0.1339	ZrCl <sub>4</sub>	0.089762	0.141779	0.050243
Níquel	0.65159	8.9802	1.1784	ZrO <sub>2</sub> (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.45801	0.24736	0.093474

El conocimiento de los materiales utilizados en la producción de tecnologías y los puntos de eco-indicador es posible calcular el impacto a los recursos humanos, la salud y el impacto de la calidad del ecosistema del sistema de cogeneración. Este cálculo se realiza añadiendo ecuaciones del impacto ambiental para el modelo de cogeneración.



El impacto ambiental de las tecnologías ( $EIM^{CHP-RS}$ ,  $EIM^{CHP-EQ}$ ,  $EIM^{CHP-HH}$ ) está definida por la suma total puntos eco-indicador de cada tecnología ( $EI\text{-points}^{CHP-RS}$ ,  $EI\text{-points}^{CHP-EQ}$ ,  $EI\text{-points}^{CHP-HH}$ ) multiplicado por la cantidad de kg por kWh usada en la tecnología ( $CTS^{CHP}$ ) y la máxima carga eléctrica producida por las tecnologías ( $W^{MAX-CHP}$ ).

$$EIM^{CHP-RS} = EI\text{-points}^{CHP-RS} (CTS^{CHP} \times W^{MAX-CHP}) \quad (3)$$

$$EIM^{CHP-EQ} = EI\text{-points}^{CHP-EQ} (CTS^{CHP} \times W^{MAX-CHP}) \quad (4)$$

$$EIM^{CHP-HH} = EI\text{-points}^{CHP-HH} (CTS^{CHP} \times W^{MAX-CHP}) \quad (5)$$

De la misma forma es calculado el impacto ambiental del ST, el impacto ambiental ( $EIM^{ST-EQ}$ ,  $EIM^{ST-HH}$ ,  $EIM^{ST-RS}$ ) está definida por el total de los puntos eco-indicador ( $EI\text{-points}^{ST-EQ}$ ,  $EI\text{-points}^{ST-HH}$ ,  $EI\text{-points}^{ST-RS}$ ) multiplicado por la cantidad de material ( $CTS^{ST}$ ) y la carga máxima almacenada ( $W^{MAX-ST}$ ).

$$EIM^{ST-EQ} = EI\text{-points}^{ST-EQ} (CTS^{ST} \times W^{MAX-ST}) \quad (6)$$

$$EIM^{ST-HH} = EI\text{-points}^{ST-HH} (CTS^{ST} \times W^{MAX-ST}) \quad (7)$$

$$EIM^{ST-RS} = EI\text{-points}^{ST-RS} (CTS^{ST} \times W^{MAX-ST}) \quad (8)$$

El eco-indicador total se determina con los puntos eco-indicador del material utilizado y los puntos eco-indicador generadas por la operación de la tecnología (emisiones de gas). En la Tabla 4 se presentan los puntos totales eco-indicadores por cada tecnología. La carga máxima eléctrica producida o almacenada es un valor obtenido del modelo de cogeneración y está en función de las demandas de energía del complejo de viviendas.

**Tabla 4.** Cantidad de material y total de puntos eco-indicador por tecnología

tecnología	Cantidad de material [kg/kWh]	Calidad del ecosistema	total puntos [pts/kg]	
			Salud humana	Recursos
MT	15.11	0.0827257	0.347666	0.350236
FC	6.65	2.20158245	13.1893216	5.469039
ICE	217.81	0.0908915	0.433561	0.4066
SE	171.19	4.27361765	26.6379002	25.1636134
ST	175	0.022672	0.15046	0.048645

### *Energía y recursos en la operación y producción.*

La energía y los recursos utilizados en el arranque y en el proceso de operación en el sistema de cogeneración tiene un impacto ambiental que se calcula a partir del consumo total de agua ( $SW^T$ ), electricidad comprada ( $W^{purchaseT}$ ), electricidad producida ( $W^{saleT}$ ), calor producido ( $HT^T$ ) y el total de combustible consumido ( $F^T$ ) multiplicado por sus puntos eco-indicador respectivamente.

El impacto ambiental del agua ( $EI^{water-EQ}$ ) es calculado por sus puntos eco-indicador ( $EI\text{-points}^{water-EQ}$ ,  $EI\text{-points}^{water-RS}$ ,  $EI\text{-points}^{water-HH}$ ) multiplicado por el consumo de agua del complejo habitacional ( $SW^T$ ). Los puntos eco-indicador del agua se encuentran descritos en Tabla 4.

$$EI^{water-EQ} = EI\text{-points}^{water-EQ} \times SW^T \quad (9)$$

$$EI^{water-RS} = EI\text{-points}^{water-RS} \times SW^T \quad (10)$$

$$EI^{water-HH} = EI\text{-points}^{water-HH} \times SW^T \quad (11)$$

El cálculo del impacto ambiental de la electricidad depende de su forma de producción, los puntos eco-indicador de la electricidad comprada ( $EI\text{-points}^{wpurchase-HH}$ ,  $EI\text{-points}^{wpurchase-EQ}$ ,  $EI\text{-points}^{wpurchase-RS}$ ) se consideran los puntos debido a la electricidad producida por una termoeléctrica y los puntos eco-indicador de la electricidad vendida ( $EI^{sale-HH}$ ,  $EI^{sale-EQ}$ ,  $EI^{sale-RS}$ ) son en base a su producción en un sistema de cogeneración. Los puntos eco-indicador que se describen en la Tabla 5 se multiplican por el total de energía comprada ( $W^{purchaseT}$ ) y el total de la electricidad producida ( $W^{saleT}$ ) para conocer el impacto ambiental.

**Tabla 5.** Puntos eco-indicador de la energía y los recursos utilizados en el sistema de cogeneración.

Energía y recursos	Puntos		
	Calidad del ecosistema	Salud Humana	Recursos
Agua[kg]	0.0064975	0.013854	0.011885
Gas natural [kWh]	0.00061644	0.0053845	0.024764
Electricidad comprada[kWh]	0.0010477	0.010885	0.039438
Electricidad vendida [kWh]	0.00036393	0.0053184	0.024389
Calor producido [kWh]	0.00184936	0.00292763	0.00121244

El combustible seleccionado que utilizan las tecnologías es el gas natural; por lo tanto, el impacto ambiental del combustible ( $EI^{fuel-HH}$ ,  $EI^{fuel-RS}$ ,  $EI^{fuel-EQ}$ ) se calcula a partir de sus puntos eco-indicador ( $EI\text{-points}^{fuel-HH}$ ,  $EI\text{-points}^{fuel-RS}$ ,  $EI\text{-points}^{fuel-EQ}$ ) multiplicado por el consumo total de combustible ( $F^T$ ). Los puntos eco-indicador se describen en Tabla 5

$$EI^{fuel-RS} = EI\text{-points}^{fuel-RS} \times F^T \quad (18)$$

$$EI^{fuel-EQ} = EI\text{-points}^{fuel-EQ} \times F^T \quad (19)$$

$$EI^{fuel-HH} = EI\text{-points}^{fuel-HH} \times F^T \quad (20)$$

Y el impacto ambiental del calor vendido ( $EI^{heat-HH}$ ,  $EI^{heat-RS}$ ,  $EI^{heat-EQ}$ ) es calculado por los puntos eco-indicador del calor generado del sistema de cogeneración ( $EI\text{-points}^{heat-HH}$ ,  $EI\text{-points}^{heat-RS}$ ,  $EI\text{-points}^{heat-EQ}$ ) multiplicado por el total del calor producido ( $HT^T$ ):

$$EI^{heat-HH} = EI\text{-points}^{heat-HH} \times HT^T \quad (21)$$

$$EI^{heat-RS} = EI\text{-points}^{heat-RS} \times HT^T \quad (22)$$

$$EI^{heat-EQ} = EI\text{-points}^{heat-EQ} \times HT^T \quad (23)$$

### *Funciones objetivo*

El modelo resuelve un problema multi-objetivo y mixto entero no lineal (MINLP), donde sus objetivos son la minimización del costo total anual, la minimización del impacto ambiental evaluando su LCA y la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero.

El objetivo de la función económica es reducir los costos de operación y mantenimiento, así como los ingresos generados por la venta de electricidad y agua caliente. Esta función objetivo económica corresponde a la minimización del costo total anual neto (TAC), que está constituida por el costo total del capital anual (CostCap<sup>T</sup>), el costo de operación (CostOp<sup>T</sup>), el costo de operación y mantenimiento (CostO & M), el costo de la energía comprada a la red de la compañía eléctrica (CostPowerPurch), la electricidad vendida a la red de energía (SalePower), la electricidad anual vendida por el sistema de cogeneración en el complejo de viviendas (Powersale) y el calor vendido a complejo habitacional (Heatsale<sup>H</sup>). Por lo tanto, el TAC se determina:

$$\begin{aligned}
TAC = & CostCap^{ST} + CostCap^{ICE} + CostCap^{MT} + CostCap^{FC} + CostCap^{SE} \\
& + CostOp^F + CostOp^{CW} + CostO\&M^{ICE} + CostO\&M^{MT} + CostO\&M^{FC} \\
& + CostO\&M^{SE} + CostPowerPurch - SalePower - Powersale^{CHP-H} \\
& - Heatsale^{-H}
\end{aligned} \tag{22}$$

La minimización del impacto ambiental (SEI), que es el segundo objetivo cuantifica el impacto ambiental de los materiales, la energía y las emisiones producidas debido a la producción de cada tecnología ( $EIManufacturing^{CHP}$ ) y el tanque de calor ( $EIManufacturing^{ST}$ ), dependiendo del tamaño del mismo, así como el agua utilizada ( $EI^{water}$ ), electricidad comprada ( $EI^{Wpurchase}$ ), la electricidad vendida ( $EI^{wsale}$ ), combustible utilizado ( $EI^{fuel}$ ) y el calor producido ( $EI^{heat}$ ), donde cada uno tiene un impacto en la salud (HH), un impacto a los recursos (RS) y un impacto en el ecosistema (EQ). Así, el SEI se calcula:

$$EIT^{HH} = EIM^{CHP-HH} + EIM^{ST-HH} + EI^{water-HH} + EI^{Wpurchase-HH} + EI^{wsale-HH} + EI^{fuel-HH} + EI^{heat-HH} \tag{24}$$

$$EIT^{RS} = EIM^{CHP-RS} + EIM^{ST-RS} + EI^{water-RS} + EI^{Wpurchase-RS} + EI^{wsale-RS} + EI^{fuel-RS} + EI^{heat-RS} \tag{25}$$

$$EIT^{EQ} = EIM^{CHP-EQ} + EIM^{ST-EQ} + EI^{water-EQ} + EI^{Wpurchase-EQ} + EI^{wsale-EQ} + EI^{fuel-EQ} + EI^{heat-EQ} \tag{26}$$

$$SEI = EIT^{HH} + EIT^{RS} + EIT^{EQ} \tag{27}$$

La minimización de las emisiones de los gases de efecto invernadero (SGHG) corresponde a la suma de las emisiones generadas por el sistema CHP ( $GHG^{CHP}$ ) y las emisiones de la compañía local de electricidad ( $GHG^{GRID}$ ):

$$SGHG = GHG^{CHP} + GHG^{GRID} \tag{28}$$

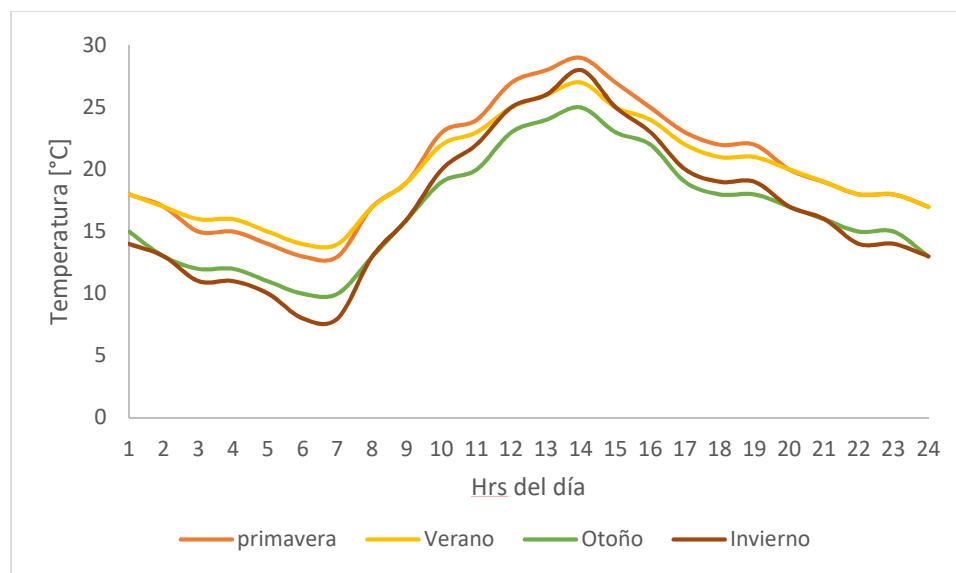
El modelo consta de los balances energéticos que implican el equilibrio de la demanda de energía en el complejo de viviendas, equilibrio de la energía eléctrica producida por las tecnologías, el tamaño el depósito térmico, el equilibrio de agua caliente para el complejo de viviendas y el equilibrio de eficiencia térmica y la potencia de cada tecnología, los costos necesarios para la operación que considera el combustible y el agua utilizada, costo capital de la tecnología y el tanque térmico, el costo de la electricidad comprada y vendida a la compañía eléctrica, los costos de operación y mantenimiento del sistema y calor vendido. Estos balances se encuentran descritos en el Apéndice A [42].

## CAPITULO 4.

### RESULTADOS

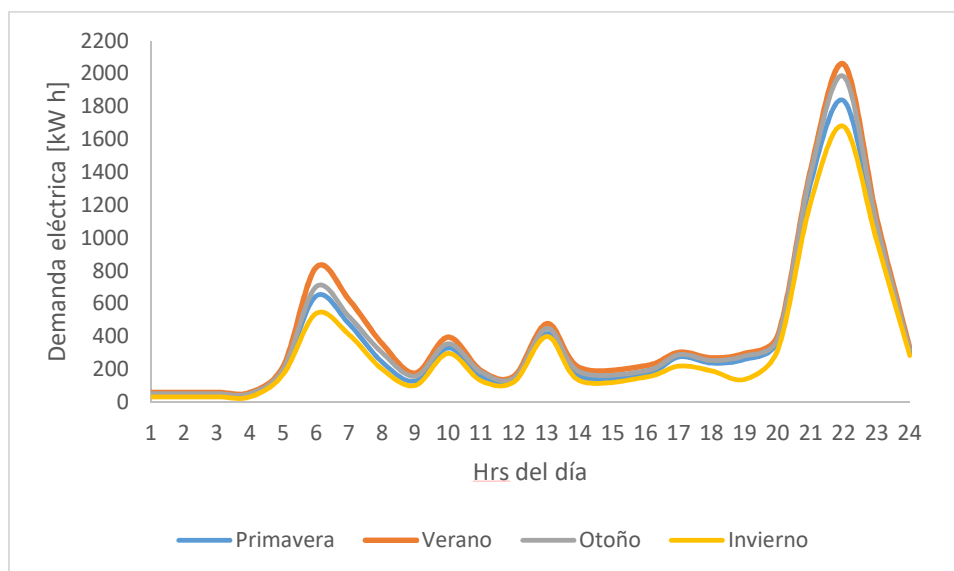
#### 4.1 Caso de estudio.

El caso de estudio considerado, es una zona residencial del estado de Morelia, Michoacán en México, la ubicación es en la zona central del estado y se compone de 1440 hogares. El clima de Morelia se clasifica como cálido y templado. Los veranos son mucho más lluviosos que los inviernos en Morelia. Los perfiles para las demandas energéticas se han obtenido aplicando un levantamiento en la zona y mediante mediciones directas. La encuesta se administró directamente en los hogares y las mediciones directas se realizaron aleatoriamente en hogares seleccionados [43]. Los perfiles de la electricidad demandada, la temperatura del medio ambiente y el agua caliente demandada se muestran en las Figuras 12, 13, 14 [43] para las diferentes estaciones del año. En el caso de estudio, se considera el promedio de la energía eléctrica durante el día, y la temperatura de suministro de agua se fija en 50° C.



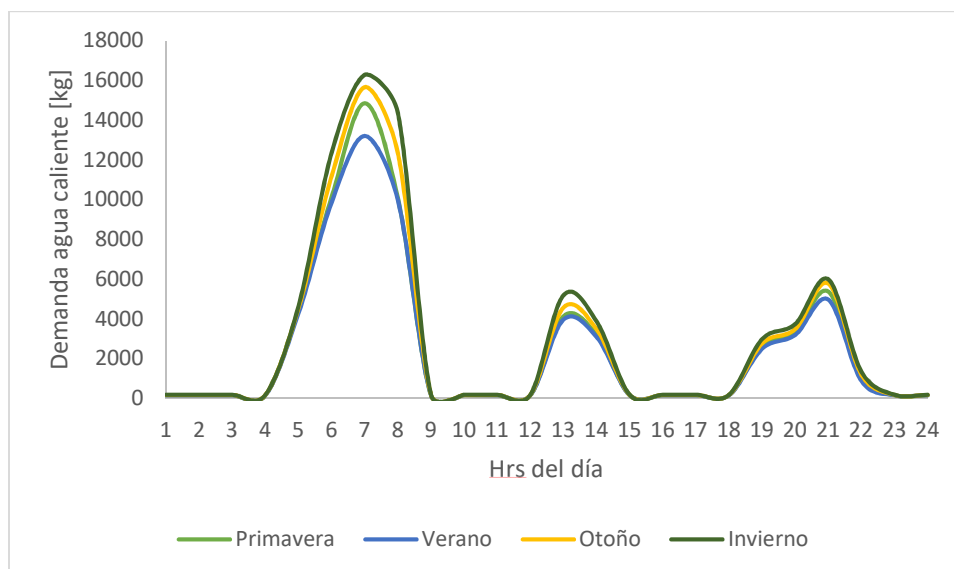
**Fig. 12.** Variación de la temperatura del caso de estudio.

En la Figura 5 se puede observar que si existe un cambio de temperaturas entre las distintas estaciones del año pero conservan el mismo comportamiento a lo largo del día, en la temporada de invierno se encuentra la temperatura más baja y temperaturas altas durante un mismo día.



**Fig. 13.** Variación de la demanda eléctrica del caso de estudio.

La demanda eléctrica mantiene un mismo comportamiento a lo largo del año y durante el día, resaltando que en invierno es donde disminuye el consumo, verano tiene el más alto consumo.



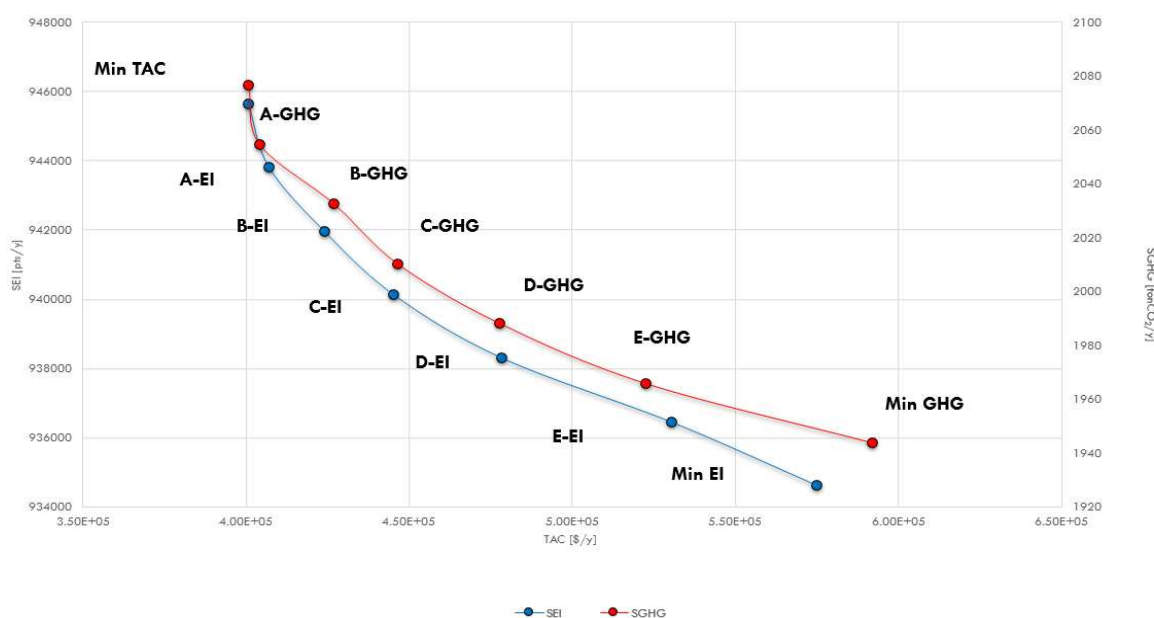
**Fig. 14.** Variación de la demanda agua caliente del caso de estudio.

La demanda de agua caliente tiene su mayor variación entre las 5 y 9 de la mañana entre las diferentes estaciones del año; sin embargo, a lo largo del año su comportamiento es muy similar.

## 4.2 Resultados.

El modelo de optimización multi-objetivo se codificó en el software GAMS [44] y el modelo contiene 4,289 variables continuas y 5,046 restricciones. El método  $\epsilon$ -constrain se llevó a cabo para obtener la curva de Pareto, el solucionador utilizado para resolver este multi-objetivo es BARON. Para el caso de estudio, se generaron cinco escenarios diferentes con el método  $\epsilon$ -constrain y el cálculo de la mejor solución utilizando el método de solución de compromiso. El tiempo de procesamiento de datos promedio es de 39 min solo para obtener un punto de la curva Pareto.

En la Figura 15 se muestra las soluciones Pareto. Las soluciones por debajo de la curva son soluciones sub-óptimas, mientras que las soluciones por encima de esta curva son soluciones no factibles, los puntos extremos representan los objetivos mínimos respectivamente, y cualquier punto de la figura corresponde a una solución óptima. La curva roja representa la solución para el costo mínimo y Emisiones mínimas y la curva azul representa la solución con el mínimo costo y el impacto ambiental mínimo, ambas curvas mostraron un comportamiento similar. El extremo superior de las curvas corresponde a los costos mínimos (con las emisiones máximas y el máximo impacto ambiental) y el extremo inferior corresponde las mínimas emisiones y el mínimo impacto ambiental (con los costos máximos). Las soluciones de los puntos en la curva roja presentan la misma combinación de tecnologías (ICE-FC), donde el tamaño de las tecnologías están cambiando a medida que se alejan o se acercan a los extremos de la curva (véase la Tabla 6).



**Figura 15.** Soluciones óptimas del caso de estudio

En la Figura 6, los puntos A, B, C en la curva azul tienen la misma solución en la combinación de tecnologías (ICE-FC) con respecto de la curva roja, sin embargo, la solución en el punto D selecciona tres tecnologías (FC, MT, ICE) para formar el sistema CHP. En la Tabla 6 se puede ver que el tamaño de la MT es pequeño en comparación con las otras tecnologías y podría ser despreciada la tecnología pero el modelo selecciona la tecnología debido a su bajo impacto ambiental, por lo tanto, en el punto D la MT reemplaza a la tecnología ICE. En ambos casos, las soluciones óptimas no producen ganancias económicas. Sin embargo, los escenarios integrados son mejores que el esquema convencional. Los escenarios presentados se obtuvieron a partir del método  $\epsilon$ -constraint, fijando el valor del TAC para conocer su GHG o EI correspondiente.

**Tabla 6.** Resultados del caso de estudio considerando solo las emisiones.

	Convencional	Min TAC	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Escenario E	Min GHG
TAC (\$/y)	506600	400940	404320	427130	446650	477720	522660	592090
GHG (tonCO <sub>2</sub> /y)	2347	2076.79	2054.609	2032.428	2010.248	1988.067	1965.886	1943.705
Tecnologías	Boiler	ICE	FC ICE	FC ICE	FC ICE	FC ICE	FC ICE	FC
Tamaño Tecnologías (kWe)	9544 l/h	72.902	2.215 70.202	16.832 61.138	28.776 53.837	46.794 42.736	69.748 25.202	102.288
Volumen tanque térmico (m <sup>3</sup> )		35.003	17.342	16.711	17.364	17.354	17.045	16.645
Costo capital anual (\$/y)	153690	23329.734	23753.064	31281.179	37445.622	46738.918	58237.21	74496.956
Costo Operación Anual (\$/y)		136010	135250	135090	134770	134480	133980	133220
Costo Mantenimiento Anual(\$/y)	133100	7517.092	7855.289	11016.087	13324.328	16723.179	20247.1	24314.81
Costo Combustible Anual(\$/y)	48755	40404.668	39643.038	39483.126	39161.379	38840.914	38371.569	37610.999
Electricidad vendida a la red(\$/y)	0	2197.577	1614.956	2785.239	3175.547	4799.044	4246.914	2663.398
Electricidad vendida a las casas (\$/y)	0	42095.714	41992.805	47469.428	51136.843	56236.382	57831.815	56734.557
Electricidad comprada a la red (\$/y)	281360	339530	339200	334990	331350	327610	325190	324940
Calor vendido a las casas (\$/y)	132880	153540	150830	151360	151020	151250	151060	150440

Los datos de la Tabla 6 y la Tabla 7 tienen alguna similitud; sin embargo, es importante señalar que el costo de capital de las tecnologías es inferior utilizando la metodología LCA que considerando las emisiones, ya que con el calor y la electricidad vendida no es suficiente para compensar el costo capital.

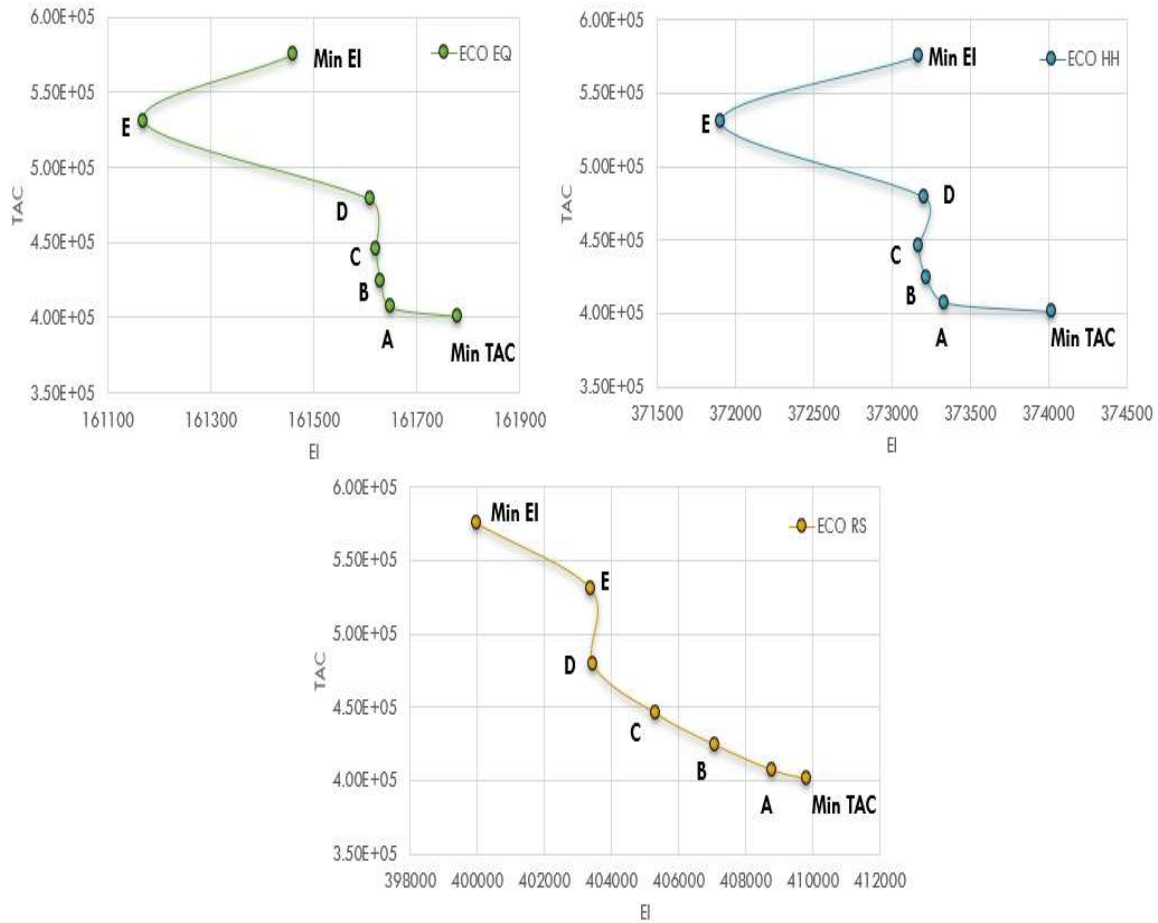


**Tabla 7.** Resultados del caso de estudio considerando metodología LCA

	Convencional	Min TAC	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Escenario E	Min GHG
<b>TAC (\$/y)</b>	506600	400940	407070	424050	445400	478490	530520	575140
<b>EI (pts/y)</b>		945630	943800	941960	940130	938290	936450	934620
<b>Tecnologías</b>	Boiler	ICE	FC ICE	FC ICE	FC ICE	FC MT ICE	FC MT	FC
<b>Tamaño Tecnologías (kWe)</b>	9544 l/h	72.902	3.494 69.493	14.984 62.319	27.597 54.283	46.1 0.504 42.01	66.675 16.304	95.87
<b>Volumen tanque térmico (m³)</b>		35.003	18.259	17.172	17.774	16.809	16.954	16.963
<b>Costo capital anual (\$/y)</b>	153690	23250.264	24456.458	30333.174	36830.386	46319.308	55865.922	70851.611
<b>Costo Operación Anual (\$/y)</b>		135940	135300	135040	134830	134540	134170	133450
<b>Costo Mantenimiento Anual(\$/y)</b>	133100	7414.759	8100.598	10585.89	12933.156	16045.993	18064.478	25054.344
<b>Costo Combustible Anual(\$/y)</b>	48755	40404.668	39687.215	39436.33	39224.394	38930.577	38559.839	37837.733
<b>Electricidad vendida a la red(\$/y)</b>	0	2197.384	1507.104	2282.597	2309.116	2811.554	2951.68	3813.297
<b>Electricidad vendida a las casas (\$/y)</b>	0	41522.649	42307.462	46643.793	49888.048	53716.153	47919.362	58460.135
<b>Electricidad comprada a la red (\$/y)</b>	281360	339820	339400	335050	331760	328240	334850	324130
<b>Calor vendido a las casas (\$/y)</b>	132880	153270	151100	151040	151170	151360	151350	151350

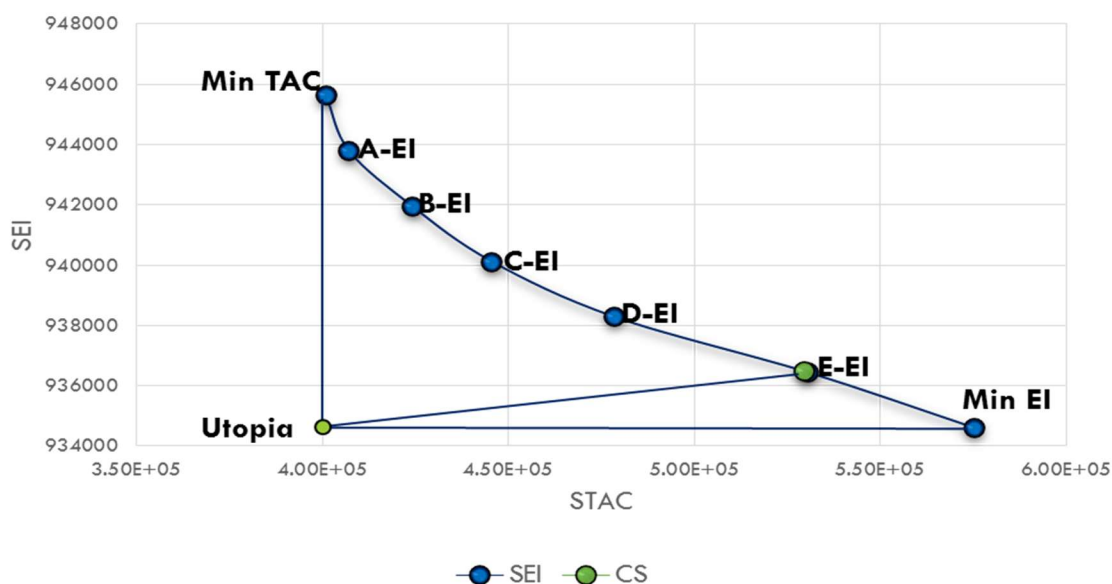
La celda de combustible es utilizada en todos los escenarios propuestos y va aumentando su tamaño conforme aumenta el costo de capital pero disminuye el impacto ambiental. Los costos de operación del sistema de cogeneración se mantienen ligeramente constante en todos los escenarios junto con el costo anual del combustible, pero el costo de mantenimiento si va aumentando en cada escenario. La electricidad comprada a la compañía va disminuyendo conforme aumenta la electricidad vendida igual a la red. La combinación microturbina y celda de combustible es la mejor manera de reducir el impacto medioambiental ya que el motor stirling necesita más material en su producción que la microturbina. El escenario B podría ser una buena opción, ya que su costo de capital no es tan alto y tiene dos tecnologías con buen tamaño, dado que si la demanda de energía aumenta, puede satisfacer las necesidades.

En la Figura 16, al graficar por separado los tres diferentes impactos, es posible observar que el utilizar la celda de combustible como única tecnología tiene un mayor impacto a la salud humana y al ecosistema que utilizar una la combinación de microturbina y celda de combustible.



**Fig. 16.** Tres diferentes impactos de la solución Pareto EI

Aplicando la estrategia del modelo utópico propuesto por Zavala [32] para obtener la solución de compromiso y así comparar las nuevas soluciones con el método de ponderación tradicional. La solución compromiso localiza automáticamente los pesos óptimos y no requiere del cálculo de la curva Pareto. La Figura 17 requiere sólo las coordenadas del punto de utopía para determinar los pesos correspondientes a la solución mínima a lo largo del frente de Pareto hasta el punto de utopía. El mejor escenario es el uso de dos tecnologías, como se muestra en la Tabla 8.



**Fig.17.** Localización de la solución compromiso en la curva Pareto.

En la solución compromiso, el costo capital es elevado pero el impacto es el mínimo, este escenario comparado con el escenario B podría ser una buena opción dependiendo del capital disponible.

**Tabla 8.** Resultados solución compromiso

	Solución Compromiso
TAC (\$/y)	5.30E+05
EI (pts/y)	9.37E+05
Tecnologías	FC MT
Tamaño Tecnologías (kWe)	65.981 16.687
Volumen tanque térmico (m <sup>3</sup> )	16.955
Costo capital anual (\$/y)	55509.095
Costo Operación Anual (\$/y)	1.33E+05
Costo Mantenimiento Anual(\$/y)	25054.344
Costo Combustible Anual(\$/y)	38574.609
Electricidad vendida a la red(\$/y)	2932.395
Electricidad vendida a las casas (\$/y)	58460.135
Electricidad comprada a la red (\$/y)	3.24E+05
Calor vendido a las casas (\$/y)	1.51E+05

Por otra parte si solo se considera las emisiones que se producen en cada tecnología como lo reportado por Fuentes-Cortés y col. (2016), la combinación de tecnologías cambia debido a los componentes de cada tecnología, el motor

de combustión interna es una tecnología que produce una menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> y su impacto ambiental es poco; sin embargo, el motor stirling produce cantidades menores de emisiones pero su impacto al medio ambiente es elevado, la microturbina genera más emisiones pero su impacto ambiental es menor y la celda de combustible produce bajas emisiones de CO<sub>2</sub> y su impacto ambiental pero su costo de capital es elevado. Por eso El modelo de cogeneración selecciona combinaciones de tecnologías para entre ellas equilibrar el costo y el impacto ambiental.

## **CAPITULO 5.**

### **CONCLUSIONES**

En este trabajo se presentó el cálculo del impacto ambiental de un sistema de cogeneración utilizando la metodología del análisis del ciclo de vida. La metodología LCA parte de las materias primas y energía necesarias en la elaboración de cualquier producto o servicio, en este caso; la energía, recursos naturales y materiales utilizados en la fabricación de las tecnologías del sistema de cogeneración y los servicios involucrados para su operación. La formulación de optimización multiobjetivo para el diseño de sistemas de cogeneración domésticos satisfaciendo sus demandas de calor y su eléctrica considerando su impacto ambiental, permite obtener beneficios económicos y ambientales a través de las diferentes combinaciones de tecnologías de cogeneración.

Con el caso de estudio seleccionado, se observa que no hubo ningún cambio significativo entre las diferentes metodologías en el aspecto medioambiental, esto se debe a como lo demuestran los resultados, el impacto más grande en el sistema CHP es el impacto de los recursos, en nuestro caso la cantidad de combustible utilizado en el sistema (gas natural) y ambas metodologías consideran este impacto, sin embargo, la metodología LCA puede ser más detallada cuando se considera los impactos generados por la explotación de los recursos para la obtención de materiales y energía y para la reutilización o el final de vida del sistema de cogeneración. La estimación de las emisiones de efecto invernadero es una buena forma de hacer un estudio previo sobre el sistema de cogeneración, pero para obtener información más específica la evaluación del ciclo de vida es la metodología más completa a la hora de tomar la decisión de implementar el sistema, ya que toma en cuenta el impacto ambiental, impacto en la salud humana e impacto recursos.

Las consideraciones de variación de la temperatura durante el día y el año; y la eficiencia de los equipos en función de la temperatura arroja soluciones más apegadas a la realidad, porque esto afecta a la demanda y la producción de energía, sin embargo, en el estudio de caso no se observa una variación en la temperatura entre las distintas estaciones del año, el modelo podría aplicarse en diferente ubicación, en la que el cambio de temperatura sea más extremo y así conocer los cambios en la solución óptima para el sistema de cogeneración.

Además, los resultados de ambas metodologías muestran beneficios económicos significativos que reducen el costo con respecto a la generación convencional y

en los términos ambientales ambas metodologías reducen los impactos ambientales.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] SENER, Progress Report Clean Energy in the Energy Matrix, Energy Ministry, Mexico City, 2009.
- [2] SENER, Progress Report Clean Energy in the Energy Matrix, Energy Ministry, Mexico City, 2016.
- [3] WEB 2014. World Energy Balances, IEA, edición 2014
- [4] EEA. Eficiencia Energética y ambiental en el sector vivienda FUNDACIÓN IDEA • Embajada Británica en México buscar año
- [5] Lasseter R.H., Smart distribution: Coupled Microgrids, Proceedings of the IEEE, 99 (6), 2011 1074-1082.
- [6] Lund H., Renewable energy strategies for sustainable development, Energy 32 (6) (2007) 912-919.
- [7] Himmelblau 2011. Optimization of chemical processes, second edition. McGraw-Hill
- [8] Bernard F. Kolanowski, Historia de la Cogeneración, Cogeneration and Competitive Power Journal, 14(2012), 74-79.
- [9] Al-Azri N, Al-Thubaiti M, El-Halwagi MM. An algorithmic approach to the optimization of process cogeneration. Clean Technol Environ Policy 2009; 11(3):329-38.
- [10] Bamufleh HS, Ponce-Ortega JM, El-Halwagi MM. Multi-objective optimization of process cogeneration systems with economic, environmental, and social tradeoffs. Clean Technol Environ Policy 2013; 15:185-97.
- [11] Environmental and Energy Study Institute, "The Role of District Energy/Combined Heat and Power in Energy and Climate Policy Solutions," 2009

- [12] Kim D, Kim J, Koo C, Hong T (2014) An economic and environmental assessment model for selecting the optimal implementation strategy of fuel cell systems—a focus on building energy policy. *Energies* 7: 5129-5150.
- [13] Hong T, Kim D, Koo C, Kom J (2014) Framework for establishing the optimal implementation strategy of a fuel-cell-based combined heat and power system: Focused on multi-family housing complex. *Applied Energy* 127:11-24.
- [14] Jiang-Jiang W, Chun-Fa Z, You-Yin J (2010) Multi-criteria analysis of combined cooling, heating and power systems in different climate zones in China. *Applied Energy* 87: 1247-1259.
- [15] Fuentes-Cortes LF, Ponce-Ortega JM, Nápoles-Rivera F, Serna-González M, El-Halwagi M (2015a) Optimal design of integrated CHP systems for housing complexes. *Energy Conversion and Management* 99: 252-263.
- [16] Fuentes-Cortes LF, LF, Dowling AW, Rubio-Maya C, Zavala VM, Ponce-Ortega JM (2016a) Integrated design and control of multigeneration systems for building complexes, *Energy* In press. DOI: 10.1016/j.energy.2016.05.093.
- [17] Fuentes-Cortes LF, Martinez-Gomez J, Ponce-Ortega JM (2016b) Optimal design of inherently safer domestic combined heat and power systems. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 4(1): 88–201.
- [18] Guinee JB, Gorree M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, de Koning A, Oers L, Sleeswijk AW, Suh S, Haes HAU, de Bruijn H, van Duin R, Huijbregts MAJ. (2002) Handbook on life cycle assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, The Netherlands.
- [19] Azapagic A, Clift R (1999) The application of life cycle assessment to process optimization. *Computers and Chemical Engineering* 23: 1509-1526.



- [20] Guillén-Gosálbez G, Grossmann IE (2009) Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty. *AIChE Journal* 55: 99-121.
- [21] Daeho, K., Jimin, K., Choongwan, K., and Taehoon, H., An economic and environmental assessment model for selecting the optimal implementation strategy of fuel cell systems—a focus on building energy policy, *Energies*. 7 (2014): 5129-5150
- [22] Balcombe P, Rigby D, Azapagic A (2015) Environmental impacts of microgeneration: integrating solar PV, Stirling engine CHP and battery storage. *Applied Energy* 139: 245-259.
- [23] Safaei A, Freireb F, Antunes CH (2015) A life cycle multi-objective economic and environmental assessment of distributed generation in buildings. *Energy Conversion and Management* 97:420-427.
- [24] Aguilar (2008). ¿Qué es Cogeneración? Primera Parte – Febrero de 2008
- [25] EPA; Reports, Catalog of CHP Technologies, U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership, March 2015
- [26] Ayat, E.O., Life Cycle Optimization model for integrated cogeneration and energy systems applications in buildings, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA, USA, 2006.
- [27] Z. Herzog (2006). "Stirling Engines". Mont Alto: Pennsylvania State University. Retrieved 2009-01-19.
- [28] IHOBE S.A., Environmental Management, Environmental Planning, Agriculture and Fisheries Basque Government, Life Cycle Analysis and Carbon Footprint, two ways of measuring the environmental impact of a product, November 2009.
- [29] Guinée JB, Gorree M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, de Koning A, Oers L, Sleeswijk AW, Suh S, Haes HAU, de Bruijn H, van Duin R, Huijbregts MAJ. (2002) Handbook on life cycle assessment. Operational Guide to

the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, The Netherlands.

- [30] The Eco-indicator 99, A damage oriented method for life cycle impact assessment, Third Edition, 2001. [https://www.pre-sustainability.com/download/EI99\\_annexe\\_v3.pdf](https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_annexe_v3.pdf) (accessed August 2016).
- [31] Loken E.; Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems; *Renew Sustain Energy Rev* 2007; 11: 1584 – 95.
- [32] Victor M. Zavala, Real-time resolution of conflicting objectives in building energy management: an Utopia-Tracking Approach, Conference Paper (2012)
- [33] Gunes M., Investigation of a fuel cell based total energy system for residential applications. Department of Mechanical Engineering. Virginia polytechnic Institute and State University. Virginia, USA, 2001.
- [34] Yodovard, P., Khedari, J., Hirunlabh, J., The potential of waste heat thermoelectric power generation from diesel cycle and gas turbine cogeneration plants, *Energy Sources*, 23 (2001): 213-224
- [35] USEPA-GHG, Environmental technology verification report: combined heat and power at a commercial supermarket-capstone 60 kw microturbine CHP system. greenhouse gas technology center southern research institute. U.S Environmental Protection Agency, Washington D.C., USA, 2003
- [36] ONSITE SYCOM, Review of combined heat and power technologies, office of Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S Department Energy, Washington D.C., USA, 1999
- [37] Siemens, SFC-200 performance 2005, <http://www.energy.siemens.com/hq/en/?tab=energy-1213565-Power%20Generation> (accessed September 2016)
- [38] Karakoussis, V., Leach, M., Vorst, v, d. R., Hart, D., Lane, J., Pearson, P., Kilner, J. Environmental emissions of SOFC and SPFC system

manufacture and disposal imperial college of science, Technology and Medicine Cronk. London, UK, 2000

- [39] Weidema B P, Bauer C, Hischer R, Mutel C, Nemecek T, Reinhard J, Vadenbo C O, Wernet G, Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen: The ecoinvent Centre (2013). <http://lca-net.com/publications/show/overview-methodology-data-quality-guideline-ecoinvent-database-version-3/> (accessed July 2016)
- [40] Althaus H.-J., Chucacoff M., Hischer R., Jungbluth N., Osses M. and Primas A. life cycle inventories of chemicals, ecoinvent report No. 8, v2.0 (2007) [https://db.ecoinvent.org/reports/08\\_Chemicals.pdf](https://db.ecoinvent.org/reports/08_Chemicals.pdf) (accessed August 2016).
- [41] Ecoinvent Version 3.3 Database (2016), [www.v32.ecoquery.ecoinvent.org](http://www.v32.ecoquery.ecoinvent.org) , (accessed May 2016)
- [42] Fuentes-Cortés, L.F., Ávila-Hernández, A., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J.M., Optimal design of CHP systems for housing complexes involving weather and electric market variations, Applied Thermal Engineering 90 (2015): 895-906
- [43] INEGI (Mexico), Annual statistics per state of Mexico, INEGI, Mexico City, 2013
- [44] Broke, A., Kendrick, D., Meeruas, A., Raman, R. GAMS-language guide. GAMS Development Corporation. Washington DC, USA 2016

# APÉNDICE A

La formulación del modelo incluye balances de energía, relaciones termodinámicas, ecuaciones de diseño y relaciones económicas, que se describen a continuación.

Los balances de energía corresponden a la electricidad generada por el sistema CHP para satisfacer la demanda de electricidad en el complejo habitacional, la producción excedente de electricidad se compra a la red. Por lo tanto, la demanda de electricidad se determina de la siguiente manera:

$$W_{t,s}^D = W_{t,s}^{purchase} + W_{t,s}^{ICE-H} + W_{t,s}^{MT-H} + W_{t,s}^{FC-H} + W_{t,s}^{SE-H}, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (A1)$$

El total de la electricidad producida se calcula a partir de la electricidad generada y la electricidad vendida a la red:

$$W_{t,s}^{CHP-Technology} = W_{t,s}^{CHP-Technology-H} + W_{t,s}^{CHP-Technology-sale}, \forall t \in T, \forall Technology, \forall s \in S \quad (A2)$$

El balance de masa en el tanque de almacenamiento térmico cuenta el flujo de entrada y salida de agua, el flujo de agua se determina por el agua enviada desde el sistema de cogeneración al tanque y el consumo de agua en el complejo de viviendas:

$$S_{t,s}^{water} = S_{t-1,s}^{water} + G_{t,s}^{RICE} + G_{t,s}^{MTG} + G_{t,s}^{FC} + G_{t,s}^{SE} - G_{t,s}^{ST}, \forall t \in T, t > 1, \forall s \in S \quad (A3)$$

$$S_{t,s}^{water} = S_{t0,s}^{water} + G_{t,s}^{RICE} + G_{t,s}^{MTG} + G_{t,s}^{FC} + G_{t,s}^{SE} - G_{t,s}^{ST}, \forall t = 1, \forall s \in S \quad (A4)$$

El balance de energía considera las capacidades caloríficas y las temperaturas de las corrientes implicadas de cada una de las tecnologías:

$$S_{t,s}^{water} Cp_t^{W-ST} T_{t,s}^{ST} = S_{t-1,s}^{water} Cp_t^{W-ST} T_{t-1,s}^{ST} + G_{t,s}^{RICE} Cp_t^{RICE} T_{t,s}^{ST} + G_{t,s}^{MTG} Cp_t^{MTG} T_{t,s}^{ST} + G_{t,s}^{FC} Cp_t^{FC} T_{t,s}^{FC} + G_{t,s}^{SE} Cp_t^{SE} T_{t,s}^{SE} - G_{t,s}^{ST} Cp_t^{ST} T_{t,s}^{ST} - Q_{t,s}^{loss}, \forall t \in T, t > 1, \forall s \in S \quad (A5)$$

$$S_{t,s}^{water} Cp_t^{W-ST} T_{t,s}^{ST} = S_{t0,s}^{water} Cp_t^{W-ST} T_{t0,s}^{ST} + G_{t,s}^{RICE} Cp_t^{RICE} T_{t,s}^{ST} + G_{t,s}^{MTG} Cp_t^{MTG} T_{t,s}^{ST} + G_{t,s}^{FC} Cp_t^{FC} T_{t,s}^{FC} + G_{t,s}^{SE} Cp_t^{SE} T_{t,s}^{SE} - G_{t,s}^{ST} Cp_t^{ST} T_{t,s}^{ST} - Q_{t,s}^{loss}, \forall t = 1, \forall s \in S \quad (A6)$$

El calor perdido de manera convectiva se calcula a partir del área del tanque de almacenamiento y depende de la temperatura ambiente, el coeficiente conectivo se considera constante:

$$Q_{t,s}^{loss} = UA(T_{t,s}^{ST} - T_{t,s}^{amb}), \forall t \in T, \forall s \in S \quad (A7)$$

$$A = \frac{1}{6}(S^{MAX-ST})^{2/3} \quad T_{t,s}^{ST} \geq 70^\circ C \quad (A8)$$

El balance para el agua caliente en el complejo de viviendas está determinado por las demandas por hora:

$$G_{t,s}^D = G_{t,s}^{ST} + G_{t,s}^{CW-H}, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (A9)$$

$$G_{t,s}^D C p_t^D T_{t,s}^D = G_{t,s}^{ST} C p_t^{W-ST} T_{t,s}^{ST} + G_{t,s}^B C p_t^{W-B} T_{t,s}^B + G_{t,s}^{CW-H} C p_t^{CW} T_{t,s}^{amb} \forall t \in T, \forall s \in S \quad (A10)$$

El análisis termodinámico define el funcionamiento del sistema de cogeneración, el rendimiento eléctrico, la eficiencia térmica y la carga parcial que se están considerando en el modelo:

$$\eta^{W^{CHP-Technology}} = \frac{W_{t,s}^{CHP-Technology}}{F_{t,s}^{CHP-Technology}}, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall CHP - Technology \quad (A11)$$

$$\eta^{Q^{CHP-Technology}} = \frac{Q_{t,s}^{CHP-Technology}}{F_{t,s}^{CHP-Technology}}, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall CHP - Technology \quad (A12)$$

El calor térmico producido por el sistema CHP se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q^{CHP-Technology} = Q_{t,s}^{CHP-Technology} C P_t^{CHP-Technology} (T_{t,s}^{CHP-Technology} - T_{t,s}^{amb}), \forall t \in T, \forall s \in S, \forall CHP - Technology \quad (A13)$$

La carga parcial determina la menor operabilidad del sistema

$$PL_{t,s}^{CHP-Technology} = \frac{W_{t,s}^{CHP-Technology}}{W_{t,s}^{MAX-CHP-Technology}}, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall CHP - Technology \quad (A14)$$

$$\begin{aligned}
PL^{CHP-Tecnology-MIN} y^{CHP-Tecnology} &\leq PL_{t,s}^{CHP-Tecnology} \\
&\leq PL^{CHP-Tecnology-MAX} y^{CHP-Tecnology}, \forall s \in S, \forall CHP - Tecnology
\end{aligned}
\tag{A15}$$

La eficiencia eléctrica es una función de la carga parcial. Las funciones de carga parcial se han obtenido basándose en los datos reportados por Sanaye et al. (2008):

$$\eta_{t,s}^{W-FC} = (-0.7799(PL_{t,s})^2 + 1.4985(PL_{t,s}) + 0.2778)\eta^{W-FC}, \forall t \in T, \forall s \in S, \tag{A16}$$

$$\eta_{t,s}^{W-ICE} = (-0.0159(PL_{t,s})^2 + 1.2(PL_{t,s}) - 0.1904)\eta^{W-ICE}, \forall t \in T, \forall s \in S, \tag{A17}$$

$$\eta_{t,s}^{W-SE} = (-0.0159(PL_{t,s})^2 + 1.2(PL_{t,s}) - 0.1904)\eta^{W-SE}, \forall t \in T, \forall s \in S, \tag{A18}$$

$$\eta_{t,s}^{W-MT} = (-0.2551(PL_{t,s})^2 + 1.135(PL_{t,s}) - 0.1117)\eta^{W-MT}, \forall t \in T, \forall s \in S, \tag{A19}$$

El tamaño del sistema CHP está determinado por el tamaño de la unidad central y el tamaño del tanque de almacenamiento térmico:

$$W^{MAX-CHP-Tecnology} \leq W^{UB-CHP-Tecnology} y^{CHP-Tecnology}, \forall CHP - Tecnology \tag{A20}$$

$$W^{MAX-CHP-Tecnology} \geq W_{t,s}^{CHP-Tecnology}, \forall t, \forall s, \forall CHP - Tecnology \tag{A21}$$

$$S^{MAX-ST} \leq S^{UB-ST} y^{ST} \tag{A22}$$

$$S^{MAX-ST} \geq \frac{S_{t,s}^{water}}{\rho^{W-ST}}, \forall t, \forall s \tag{A23}$$

Los parámetros económicos se determinan por el costo asociado al sistema de cogeneración en función del tamaño y funcionamiento de las tecnologías, se calcula el costo de capital para las tecnologías calculando un factor de anualización multiplicado por el tamaño y elevado en el exponente que representa las economías de escala:

$$\begin{aligned}
CostCap^{CHP-Tecnology} &= k_F (FC^{CHP-Tecnology} y^{CHP-Tecnology} + VC^{CHP-Tecnology} [W^{MAX-CHP-Tecnology}]^{\beta^{CHP-Tecnology}})
\end{aligned}
\tag{A24}$$

Del mismo modo, para el costo de capital para el tanque de almacenamiento:

$$CostCap^{ST} = k_F (FC^{ST} y^{ST} + VC^{ST} [S^{MAX-ST}]^{\beta^{ST}}) \quad (A25)$$

El costo de operación incluye el costo del combustible y del agua fría:

$$CostOP^{Fuel} = UCF \sum_s H_D \sum_t F_{t,s}^{CHP-technology} \quad (A26)$$

$$CostOP^{CW} = UCCW \sum_s H_D \sum_t (G_{t,s}^{CHP-technology} + G_{t,s}^{CW-H}) \quad (A27)$$

$$CostOP^T = CostOP^{Fuel} + CostOP^{CW} \quad (A28)$$

El costo de operación y mantenimiento se determina de la siguiente manera:

$$CostOM = UCOM \sum_s H_D \sum_t W_{t,s}^{CHP-technology} \quad (A29)$$

El costo de compra de electricidad depende de la electricidad comprada en los períodos de máxima actividad:

$$CostPowerPurch = \sum_s H_D \sum_t UCP_t^{purchase} W_{t,s} \quad (A30)$$

La venta de electricidad y calor se determina teniendo en cuenta la producción del sistema CHP:

$$Powersale^{CHP} = VCP \sum_s H_D \sum_t (W_{t,s}^{CHP-technology} + W_{t,s}^{CHP-sale}) \quad (A31)$$

$$Heatsale^H = UCH \sum_s H_D \sum_t Q_{t,s}^{CHP-technology} \quad (A32)$$

La solución compromiso se determina sobre el punto utópico que es el mínimo de las funciones de los objetivos.

$$CS = \frac{\min TAC - \text{lowerbound}TAC}{\text{upperbound}TAC - \text{lowerbound}TAC} + \frac{\min SEI - \text{lowerbound}SEI}{\text{upperbound}SEI - \text{lowerbound}SEI} \quad (A33)$$